



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**ANALÝZA OBJEKTIVNÍCH KRITÉRIÍ KVALITY SÁLU
DIVADLA NA ORLÍ**

ANALYSIS OF ACOUSTIC SPACE OBJECTIVE QUALITY CRITERIA OF ORLÍ STREET THEATRE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Bělunek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Adam Bělunek

ID: 174442

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Analýza objektivních kritérií kvality sálu Divadla na Orlí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V prostředí Matlab vytvořte funkci pro výpočet monaurálních a binaurálních impulsních odezev ze zvukových záznamů pořízených v Divadle na Orlí při umístění zdroje zvuku v orchestřišti a jevišti a v konfiguraci sálu s odstraněnými veškerými pohltivými prvky a poté s nainstalovaným scénickým řešením. Proveďte také vlastní měření impulsových odezev. V prostředí Matlab dále vytvořte funkce, které budou z těchto odezev počítat kmitočtovou odezvu a širokopásmová objektivní monaurální a binaurální kritéria kvality poslechových prostorů. Vytvořte také funkce, které umožní statistické zpracování vypočtených parametrů, zejména střední hodnotu a rozptyl, a porovnání parametrů při různých konfiguracích sálu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2, vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s., ISBN 0451480

[2] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. „Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů“. Akustické listy, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Podstata teoretické části této závěrečné práce tkví v shrnutí základních zákonů a principů prostorové akustiky, chování zvukových vln při průchodu prostředím, doby dozvuku, zvukové pohltivosti, impulsové charakteristiky a jejího měření. Dále také v definování některých objektivních kritérií kvality koncertních sálů. Najdeme zde základní časová kritéria, jako je doba dozvuku, počáteční doba dozvuku i míra podpory vysokých a nízkých frekvencí dozívání sálu, dále také energetická kritéria, jako je objektivní jasnost, zřetelnost nebo míra hlasitosti a některá další.

Hlavní těžiště praktické části práce spočívá v naprogramování skriptu v programovacím prostředí Matlab, který načítá impulsové charakteristiky a počítá některé z objektivních kritérií kvality koncertních sálů, zároveň tyto výsledky statisticky zpracovává a porovnává je s očekávanými hodnotami. V práci je tento skript podrobně rozebrán a je popsána jeho funkce. Pro ověření funkčnosti byly provedeny výpočty, jejichž výsledky také najdeme v praktické části práce. Funkčnost byla demonstrována na výpočtech z impulsových charakteristik, které byly naměřeny v sále Divadla na Orlí při různých pozicích mikrofону a čtyřech rozdílných konfiguracích akustických prvků v sále divadla. V závěru práce jsou výsledky výpočtů okomentovány a porovnány v závislosti na konfiguracích sálu. Dále jsou součástí práce také skripty pro výpočet a vykreslení frekvenční charakteristiky a impulsové odezvy.

Klíčová slova: prostorová akustika, objektivní kritéria kvality sálu, doba dozvuku, impulsová charakteristika, Matlab

Abstract

The core of the theoretical part of this work lies in a summary of basic laws and principles of a room acoustics, behavior of sound waves, reverberation time, sound absorption, impulse response and methods of measurement. Furthermore, the work describe and define some of the objective quality criteria of concert halls we know. We can find basic time criteria (e.g. reverberation time, early decay time, bass ratio, high frequency ratio...) and energy criteria (e.g. objective clarity, strenght of arriving energy...) etc..

The main focus is on a script, that is programmed in Matlab. It handles calculation of some objective quality criteria of concert halls. The function of the program is described. There are some trial calculation, that are evaluated. Functionality is demonstrated on some impulse responses, that were measured in hall of a theatre Divadlo na Orlí. The positions of microphones were different and also the configuration of acoustics elements in this hall was changing. Results were compared and commented. Another part of this work are scripts for calculations of impulse response and frequency response.

Keywords: room acoustics, objective quality criteria of a concert halls, reverberation time, impulse response, Matlab

Bibliografická citace mé práce:

BĚLUNEK, A. *Analýza objektivních kritérií kvality sálu Divadla na Orlí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 62 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza objektivních kritérií kvality sálu Divadla na Orlí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 6.6.2017

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	- 8 -
2	Teoretická část	- 8 -
2.1	Prostorová akustika	- 8 -
2.2	Útlum zvuku při šíření prostředím	- 8 -
2.3	Zvuková pohltivost	- 9 -
2.4	Statistická akustika	- 10 -
2.5	Doba dozvuku	- 11 -
2.6	Impulsová charakteristika a její měření	- 13 -
2.7	Objektivní kritéria kvality koncertních sálů	- 14 -
2.8	Jednočíselná klasifikace akustické kvality koncertních sálů	- 20 -
2.9	Sál Divadla na Orlí	- 20 -
3	Praktická část	- 21 -
3.1	Matlab	- 21 -
3.2	Rozdělení programu pro výpočet objektivních kritérií	- 21 -
3.2.1	„Monaural.m“	- 22 -
3.2.2	„statistikaMonaural.m“	- 22 -
3.2.3	„BinauralOMNI.m“ a „BinauralFOE.m“	- 22 -
3.2.4	„statistikaBinaural.m“	- 22 -
3.2.5	„BRHFR.m“	- 22 -
3.2.6	„statistikaBRHFR.m“	- 23 -
3.2.7	„IACCfinal.m“	- 23 -
3.2.8	„statistikaIACC.m“	- 23 -
3.2.9	„Filtrace.m“	- 23 -
3.2.10	„Filtracethird.m“	- 23 -
3.2.11	„DobaDozvuku.m“	- 23 -
3.3	Programy pro výpočet kmitočtové odezvy a impulsové odezvy	- 23 -
4	Popis algoritmu výpočtů jednotlivých kritérií	- 23 -
4.1	Popis algoritmu výpočtu monaurálních kritérií	- 23 -
4.2	Popis statistiky a vyhodnocení monaurálních kritérií	- 25 -
4.3	Popis algoritmu výpočtů binaurálního kritéria LF	- 25 -
4.4	Popis algoritmu statistiky a vyhodnocení výpočtů binaurálního kritéria LF	- 25 -
4.5	Popis algoritmu výpočtů kritérií BR a HFR	- 26 -
4.6	Popis algoritmu statistiky a vyhodnocení pro kritéria BR a HFR	- 26 -

4.7	Popis algoritmu výpočtů IACC	- 27 -
4.8	Popis algoritmu statistiky a vyhodnocení pro IACC.....	- 27 -
4.9	Popis algoritmu pro výpočet kmitočtové odezvy	- 28 -
4.10	Popis algoritmu pro výpočet impulsové odezvy.....	- 28 -
5	Zhodnocení výsledků.....	- 28 -
5.1	Zhodnocení výsledků monaurálních kritérií	- 28 -
5.1.1	operní představení Impresário	- 28 -
5.1.2	operní představení Mirandolina.....	- 30 -
5.2	Zhodnocení výsledků kritéria Lateral Fraction	- 32 -
5.2.1	operní představení Impresário	- 32 -
5.2.2	operní představení Mirandolina.....	- 33 -
5.3	Zhodnocení výsledků kritérií BR a HFR.....	- 33 -
5.3.1	operní představení Impresário	- 33 -
5.3.2	operní představení Mirandolina.....	- 34 -
5.4	Zhodnocení výsledků kritéria IACC.....	- 35 -
5.4.1	operní představení Mirandolina.....	- 35 -
5.5	Zhodnocení výsledků kritéria G.....	- 35 -
5.6	Porovnání frekvenčních charakteristik a impulsových odezev	- 36 -
6	Závěr	- 37 -
	Zdroje	- 37 -
	Seznam použitých zkratk	- 38 -
	Seznam příloh.....	- 39 -
	Přílohy	- 40 -

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je vytvoření skriptu v prostředí Matlab, který bude obsahovat funkce pro výpočet monaurálních a binaurálních objektivních kritérií z impulsových odezev, které byly naměřeny v Divadle na Orlí při různém scénickém řešení. Dále je cílem provedení vlastních měření impulsových odezev a také naprogramování dalších funkcí, které umožní statistické zpracování vypočtených parametrů, zejména střední hodnotu a rozptyl a porovnání parametrů při různých konfiguracích sálu. Dalšími cíli je naprogramování skriptu, který počítá a vykresluje impulsové odezvy z naměřených zvukových vzorků a také skript pro výpočet a vykreslení frekvenční odezvy.

V teoretické části jsou shrnuty důležité pojmy a zákony týkající se akustiky uzavřených prostor. Je zde popsáno chování zvukové vlny při dopadu na překážku, pohltivost materiálů a tzv. koeficient pohltivosti, metody statistické akustiky, doba dozvuku i impulsová odezva a metody měření. Dále jsou v teoretické části definována objektivní kritéria, jejichž výpočet je následně prováděn pomocí funkcí v Matlabu. Na závěr teoretické části jsou zmíněny také metody pro jednočíselnou klasifikaci akustické kvality sálů.

Praktická část začíná krátkým představením programového prostředí Matlab, dále zde popisují, jak jsem si jednotlivé výpočty rozdělil do samostatných funkcí a také rozdělení statistických výpočtů. Následuje detailní popis funkce programu pro výpočty jednotlivých kritérií, popis funkce programu pro statistické výpočty a popis funkce programu pro výpočet impulsové odezvy a frekvenční odezvy. Na závěr praktické části jsou vyhodnocena výsledná data, která jsou porovnána mezi sebou v závislosti na dané konfiguraci sálu a také porovnána s preferovanými hodnotami. Nechybí také srovnání grafických výstupů.

2 Teoretická část

2.1 Prostorová akustika

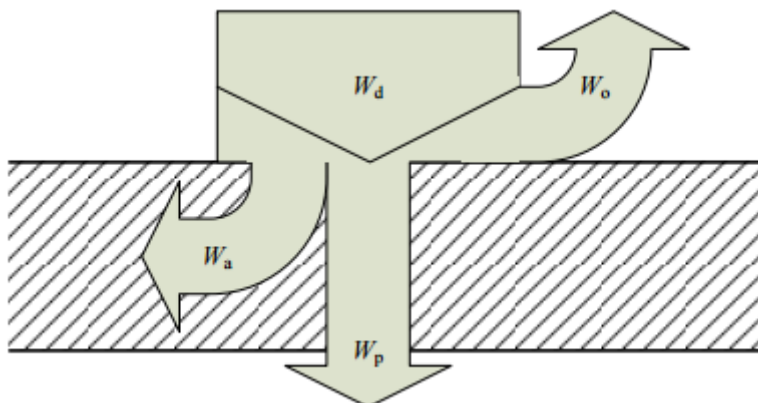
Prostorová akustika se zabývá chováním zvukových vln v uzavřených prostorech. Může se jednat o obytné místnosti, velké haly, koncertní sály nebo nahrávací studia. Všechna tyto místa mají určité vlastnosti, které určují, jak se zvuk uvnitř bude chovat. Akustické vlastnosti uzavřeného prostoru mohou být určovány objemem místnosti, obsahem stěn, materiálem stěn, velikostí ploch oken a dalšími parametry. Zároveň máme na každé z již zmíněných míst různé požadavky. Obecně lze říci, že například v nahrávacím studiu budeme mít požadavek na minimální dobu dozvuku, která se bude pohybovat např. okolo 0,5 s, zatímco u velkých koncertních sálů se běžně pohybuje okolo 2 s. Hodnocení akustické kvality prostor se však neomezuje pouze na porovnávání doby dozvuku, ale v dnešní době se běžně používají mnohá další kritéria kvality zvukové pole koncertních a operních sálů.

2.2 Útlum zvuku při šíření prostředím

Kromě útlumu zvukového vlnění vlivem snižování intenzity zvuku se vzdáleností od zdroje zvuku, kdy se zvuková energie rozděluje na vzrůstající plochu, sledujeme také útlum zvuku přeměnou zvukové energie na energii jinou nebo deformací vlivem nehomogenit prostředí. I když určitý útlum vzniká i v závislosti na atmosférických podmínkách (teplota, mlha, déšť, vítr), největší vliv má útlum způsobený fyzickými překážkami. [1]

Při dopadu zvukové vlny na překážku můžeme obecně sledovat tři děje: průchod, odraz a absorpce. - Pokud je rozměr překážky větší než vlnová délka zvukové vlny, část energie zvukové vlny se odrazí zpět, část projde přes překážku a část energie bude absorbována. Část absorbované energie se mění na

tepelnou energii a zbývající část může projít skrze překážku a vyzářit se zpět do prostoru. Absorpce je kmitočtově závislá. Důležité jsou také rozměry překážky. [1]



Obr. 1: průchod, odraz a útlum zvukové vlny při nárazu na překážku [1]

2.3 Zvuková pohltivost

Zvuková pohltivost je schopnost tělesa pohlcovat zvuk a značí se α . Můžeme ji definovat jako poměr pohlcené energie W_a (J) určitou plochou k energii dopadající na tuto plochu W_d (J). [1]

$$\alpha = \frac{W_a}{W_d} \quad (1) [1]$$

Obecně lze říci, že měkčí povrchy absorbují spíše vyšší kmitočty, zatímco tvrdé materiály absorbují spíše nižší kmitočty. Dále platí také to, že strukturované povrchy mají lepší absorpční vlastnosti než povrchy hladké.

Tab. 2.1: koeficienty pohltivosti pro různé materiály a objekty. [2]

Materiál	Koeficient pohltivosti α (-)					
	Frekvence					
	128 Hz	256 Hz	512 Hz	1024 Hz	2048 Hz	4096 Hz
Acoustex 40R	0,16	0,27	0,50	0,88	0,80	0,70
Acoustone D	0,13	0,26	0,79	0,88	0,76	0,74
Akustická omítka	0,30	0,40	0,50	0,80	0,55	0,50
Cihlová zeď, bez nátěru	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
Koberec	0,11	0,25	0,37	0,34	0,27	0,24
Celotex C3	0,25	0,27	0,76	0,88	0,60	0,25
Lehké záclony	0,04	0,08	0,11	0,25	0,30	0,30
Těžké závěsy	0,10	0,27	0,50	0,80	0,82	0,75
Betonová podlaha	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Dřevěná podlaha	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Podlaha z linolea	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Sklo	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Dlažba	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Permacoustics	0,19	0,34	0,74	0,76	0,75	0,74
Hladká omítka	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Temcoustic F2	0,33	0,40	0,54	0,52	0,50	0,42
Mříž ventilace	0,50	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25
Dřevěné obložení	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
Objekt	Koeficient pohltivosti α (-)					
	Frekvence					
	128 Hz	256 Hz	512 Hz	1024 Hz	2048 Hz	4096 Hz
Dospělá osoba sedící v publiku	1,50	2,50	3,80	5,00	4,80	4,50
Židle	0,15	0,16	0,17	0,19	0,20	0,19
Divadelní křeslo, dřevěná dýha	0,18	0,20	0,22	0,25	0,25	0,23
Divadelní křeslo, kožené čalounění	1,00	1,20	1,40	1,60	1,60	1,50
Divadelní křeslo, plyšové čalounění	1,50	2,00	2,50	2,80	3,00	3,00

2.4 Statistická akustika

Na problematiku akustiky uzavřených prostorů můžeme nahlížet z pohledu tzv. geometrické akustiky, vlnové akustiky nebo akustiky statistické. Geometrická akustika analyzuje akustiku uzavřených prostor pomocí tzv. zvukového paprsku, který je buďto přímý nebo odražený. Geometrická akustika zanedbává možnost ohybu zvukového vlnění. Vlnová akustika se používá při analýze prostor s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou zvukového signálu. Používá se také při analýze akustického pole pro zvukové vlnění v oblasti velmi nízkých kmitočtů. Vychází ze základních zákonů mechaniky prostředí, v němž se šíří zvuk a formuluje vlnovou rovnici a příslušné hraniční a okrajové podmínky. [1]

V této práci je využito metod statistické akustiky, protože tato teorie je založena na nalezení průměrných hodnot a vyhovuje tak lépe potřebám oceňování jakosti uzavřených prostorů. Základní veličiny, které charakterizují zvukové pole ve statistické teorii jsou veličiny energetické. Převážně se jedná o hustotu zvukové energie a intenzitu zvuku. [1]

Základní předpoklady statistických modelů:

- „Velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn.
- Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně velká.
- Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností.“ [1]

2.5 Doba dozvuku

Doba dozvuku je základní parametr, který nám umožňuje výpočet objektivních parametrů a klasifikaci akustické kvality koncertních sálů. Definujeme ji jako dobu po vypnutí zdroje zvuku, za kterou klesne akustická energie o 60 dB. Můžeme ji vypočítat ze změřené impulsové charakteristiky nebo pomocí teoretických výpočtů, kterých máme k dispozici několik. [1]

$$1. \text{ Doba dozvuku podle Sabina: } T = 0,164 \frac{V}{\alpha_S} . \quad (2) [1]$$

$$2. \text{ Doba dozvuku podle Eyringa: } T = 0,164 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{str})} . \quad (3) [1]$$

$$3. \text{ Doba dozvuku podle Millingtona: } T = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} , \quad (4) [1]$$

kde V (m^3) je objem místnosti, α (-) je činitel zvukové pohltivosti stěn, α_{str} (-) je střední hodnota činitele zvukové pohltivosti stěn, S_i (m^2) jsou plochy jednotlivých povrchů stěn s činitelem pohltivosti α_i (-). [1]

Doba dozvuku je kmitočtově závislá, takže se měří v oktávových nebo třetinooktávových pásmech v rozsahu středních kmitočtů 125 Hz až 4 kHz. Jak již bylo řečeno, doby dozvuku je definována jako pokles o 60 dB, takže se značí jako T_{60} nebo $RT60$. [1]

Pro měření doby dozvuku se používá metoda integrované impulsní odezvy, kterou rozvinul Schröder nebo metoda přerušovaného šumu. Metoda, která využívá impulsní odezvu, tvrdí, že po vybuzení měřené místnosti Diracovým impulsem, z impulsové odezvy určíme pokles energie dozvuku $W(t)$:

$$W(t) = \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau = \int_0^\infty p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau. \quad (5) [1]$$

Po zavedení označení

$$W_t = \int_0^t p^2(\tau) d\tau \quad (6) [1]$$

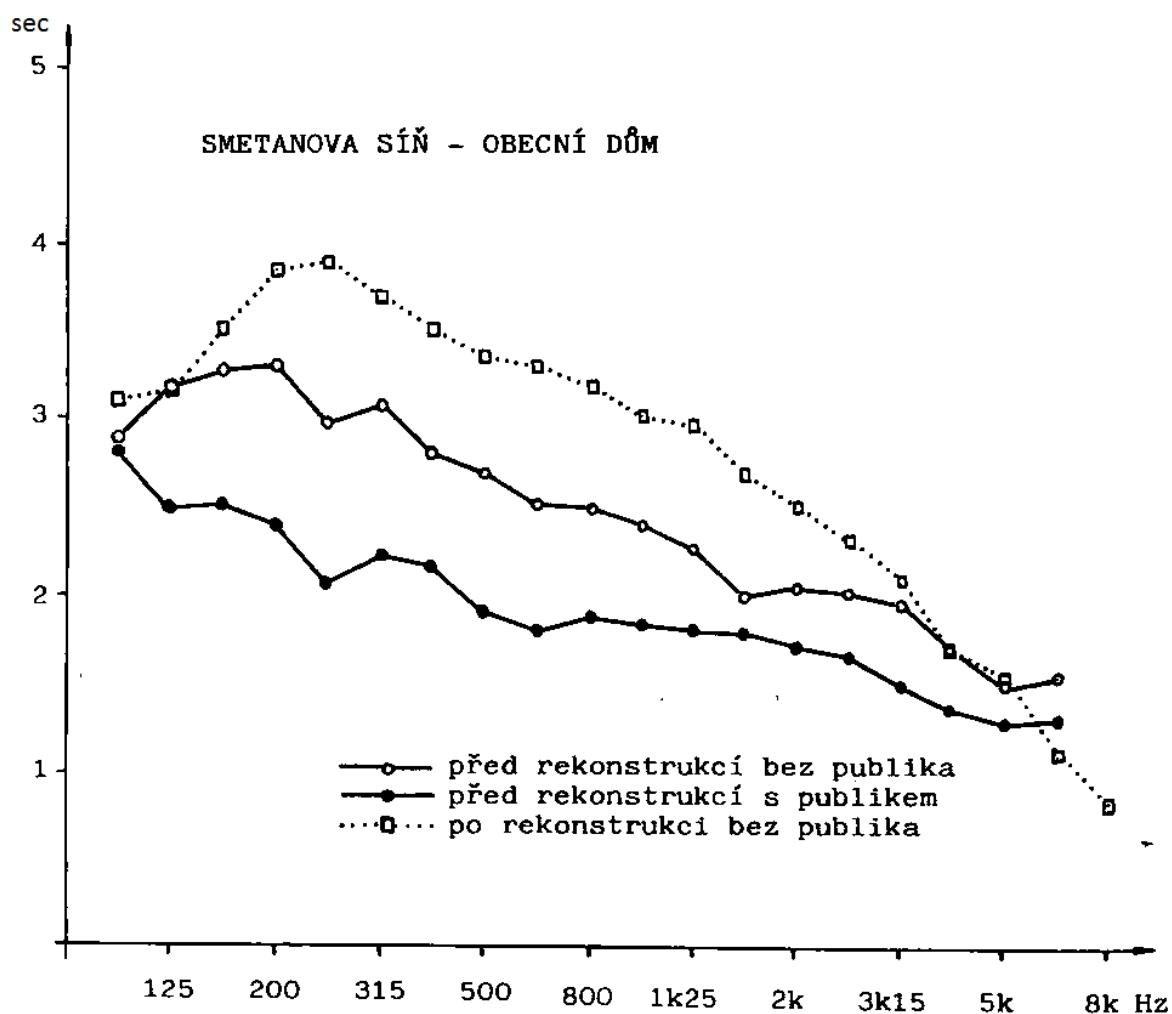
můžeme určit vztah pro pokles hladiny akustického tlaku, který odpovídá poklesu energie dozvuku $D(t)$:

$$D(t) = 10 \cdot \log\left(1 - \frac{W_t}{W_\infty}\right), \quad (7) [1]$$

přičemž ve vybuzeném stavu by měla hladina odpovídat 0 dB. Doba dozvuku se pak určuje ze směrnice regresivní přímky, kterou je pokles proložen. [1]

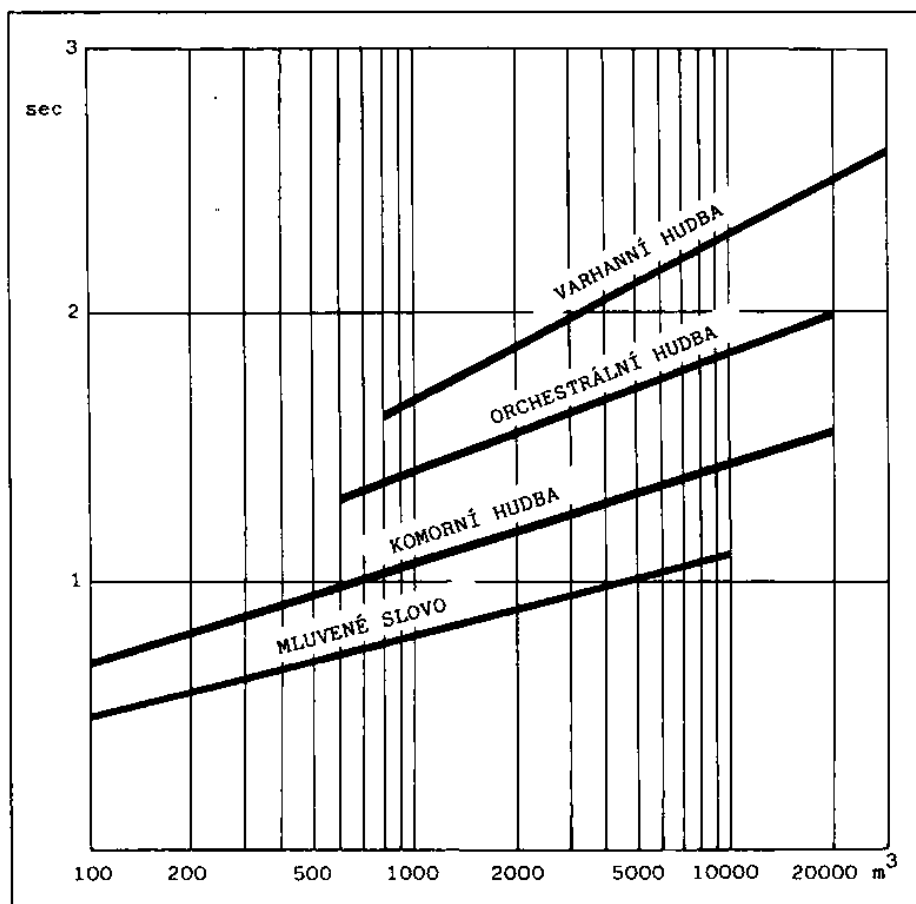
Doba dozvuku se mění také v závislosti na tom, zdali je při měření daný sál plný nebo prázdný. Co se týče kapacity místnosti, na jednoho posluchače by mělo připadat nejméně 3-4 m³ objemu místnosti. Čím je však podíl objemu místnosti na posluchače větší, tím méně se liší doba dozvuku sálu s publikem a bez publika. U moderních sálů je tedy preferován větší podíl objemu místnosti na posluchače. V sále Divadla na Orlí je to 10,92 m³ na osobu. Podobně je tomu např. v sále Berlínské filharmonie, kde je podíl objemu na osobu 11 m³, nebo v Meistersingerhalle v Norimberku 11,5 m³. [3]

Na obrázku níže můžeme vidět, jak se doba dozvuku liší v sále zaplněným publikem a bez publika. Konkrétně se jedná o Dvořákovu síň v Rudolfinu. Dále můžeme vidět, jaký vliv má v případě tohoto sálu na dobu dozvuku rekonstrukce, které sice nebyla nijak rozsáhlá, obsahovala však mechanické úpravy podia, opravy hlediště, vymalování nebo změny textilií. [4]



Obr. 2: Doba dozvuku Smetanovy síně [4]

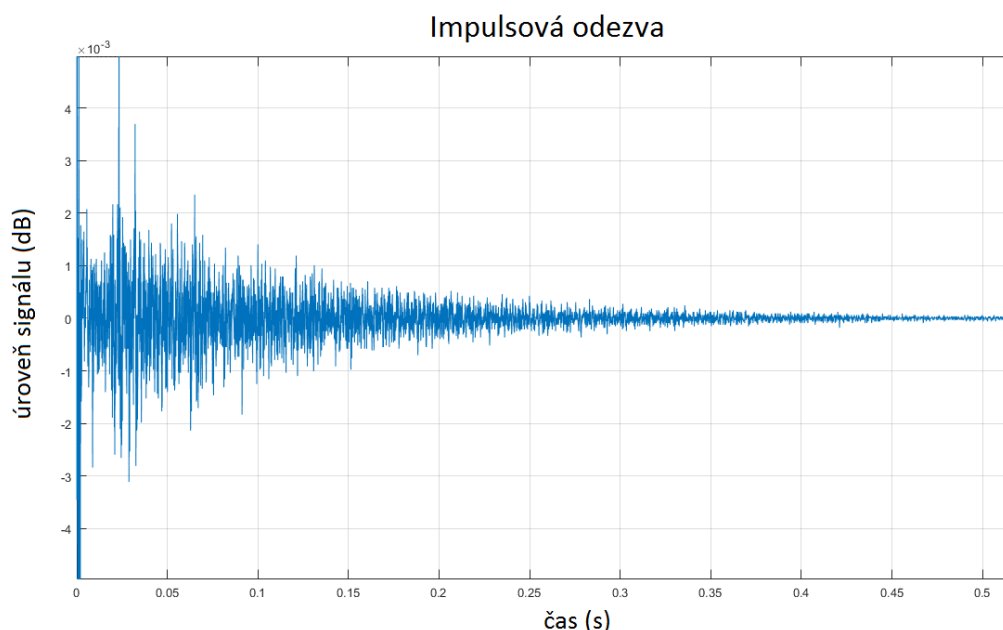
Údaje o požadovaných dobách dozvuku v závislosti na objemu místnosti a určení místnosti lze najít v normách ČSN 73 0525 [5] a ČSN 73 0527 [6] viz. Obr. 3.



Obr. 3: Závislost optimální doby dozvuku na objemu obsazeného sálu pro frekvenci 1 kHz [4]

2.6 Impulsová charakteristika a její měření

Impulsová charakteristika je zásadní prostředek pro získání některých objektivních kritérií kvality koncertních sálů. Jedná se o odezvu prostoru na krátký impulsový zvuk. V impulsové charakteristice máme zaznamenány časy dopadů všech odražených i přímých vln do uší posluchače, resp. mikrofonu. Impulsová charakteristika má svůj typický tvar, který můžeme rozdělit na tři základní části. Na začátku impulsové charakteristiky jsou přímé vlny, které od zdroje v mikrofonu dorazily přímou cestou s minimálním zpožděním, za těmito vlnami se nacházejí tzv. přímé odrazy, které jdou k mikrofonu po jednom odrazu např. od podlahy. Třetí část impulsové charakteristiky představují mnohonásobné odrazy, viz. obr. 4 níže. [1]



Obr. 4: Výřez z impulsové odezvy sálu Divadla na Orlí

Pro změření impulsové charakteristiky bychom ideálně použili Diracův impuls, který však reálně aproximujeme použitím zdrojů zvuku s krátkou dobou trvání, rovnoměrnou spektrální hustotou a s co nejvyšším akustickým výkonem (např. výstřel signální pistole). [1]

Pokud známe vstupní a výstupní signál, můžeme impulsovou charakteristiku získat jejich dekonvolucí. Vstupní signál by měl mít rovnoměrně rozloženou spektrální hustotu výkonu a také co nejvyšší akustický výkon (např. bílý nebo růžový šum). [1]

Postup získání impulsové odezvy $h[n]$ ze vstupního $x[n]$ a výstupního signálu $y[n]$, je takový, že nejprve provedeme rychlou tzv. rychlou Fourierovu transformaci (Fast Fourier transform, FFT) vstupního signálu $x[n]$ a $y[n]$, poté je nutno provést dělení polynomů $y[n]/x[n]$. Na výsledek dělení je potřeba aplikovat tzv. zpětnou Fourierovu transformaci (Inverse fast Fourier transform, IFFT) a jejím výsledkem je impulsová odezva systému. [7]

Při použití stochastických signálů můžeme mít problém se zkreslením vstupního signálu nebo synchronizací výstupního a vstupního signálu, proto se používají metody využívající deterministické signály. Jednou z nich je metoda TDS (Time Delay Spectrometry), u které je používán přeladovaný harmonický signál. Rozšířená je také metody MLS (Maximum Length Sequence), která používá pseudonáhodný binární šum. [1]

2.7 Objektivní kritéria kvality koncertních sálů

Velmi důležitým prvkem celé práce jsou objektivní kritéria kvality sálů, která jsou zároveň součástí veškerých měření a výpočtů, proto bych je zde měl uvést i s jejich definicemi.

Objektivní kritéria kvality koncertních sálů jsou určité parametry, díky nimž můžeme číselně klasifikovat akustiku určitých prostor. Dělíme je na kritéria časová a energetická. [8]

Časová kritéria

Reverberation Time (RT) – doba dozvuku je patrně nejpoužívanějším kritériem z časových kritérií. Je definovaná jako doba, za kterou klesne hustota zvukové energie nebo intenzita

zvuku po vypnutí zdroje zvuku o 60 dB. Používá se označení T_{60} případně RT . Doba dozvuku je určena přímkou se směrnici b , která je proložena dozvukovým poklesem $D(t)$ v úseku mezi hladinami $D = -5$ dB až $D = -35$ dB. [8]

$$T_{60} = -\frac{60}{b}. \quad (8) [8]$$

Dozvukový pokles $D(t)$ je definován jako:

$$D(t) = 10 \cdot \log\left(1 - \frac{E_t}{E_\infty}\right). \quad (9) [8]$$

Bass Ratio (BR) – dalším kritériem je míra podpory hlubokých tónů doznívání sálů. Určuje se poměrem dob dozvuků v oktávních pásmech 125 a 250 Hz k době dozvuku v oktávních pásmech 500 a 1000 Hz. [8]

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}. \quad (10) [8]$$

RT_{125} značí dobu dozvuku v oktávním pásmu 125 Hz. Analogicky pak RT_{250} , RT_{500} a RT_{1000} značí dobu dozvuku v oktávních pásmech 250 Hz, 500 Hz a 1000 Hz. Hodnoty BR se mají blížit 1, ale nikdy by neměly klesnout pod 1. [8]

High Frequency Ratio (HFR) – parametr HFR je velmi podobný BR , ale na rozdíl od hlubokých tónů je zde zkoumána míra podpory vysokých tónů doznívání sálu. Opět se určuje pomocí poměrů dob dozvuků pro jednotlivá oktávní pásma. [8]

$$HFR = \frac{RT_{500} + RT_{1000}}{RT_{2000} + RT_{4000}}. \quad (11) [8]$$

Early Decay Time (EDT) – dalším důležitým parametrem je počáteční doba dozvuku, která se (stejně jako doba dozvuku RT) získává ze sklonu křivek oktávového pásma integrované impulsní odezvy. Sklon této křivky se určuje ze sklonu regresní přímky, kterou je proložena příslušná část křivky poklesu. Na rozdíl od doby dozvuku se však počáteční doba dozvuku získává z prvních 10 dB poklesu. [8]

Energetická kritéria

Energetická kritéria vychází z energetických poměrů signálů pro definované časové úseky průběhů získané impulsové odezvy prostorů. [8]

Objective clarity (C_T) – objektivní jasnost je prvním kritériem z kategorie energetických kritérií. Je definována jako poměr zvukové energie, která přijde do místa příjmu do času T k energii, která přijde od tohoto času dále. Pokud tento parametr dosáhne vyšších hodnot, znamená to, že v daném prostoru zaznamenáváme větší množství počáteční energie, což koresponduje se subjektivním vjemem jasnosti. [8]

$$C_T = 10 \cdot \log \frac{\int_0^T h^2(t) dt}{\int_T^\infty h^2(t) dt} = 10 \cdot \log \frac{E_T}{E_\infty - E_T}. \quad (12) [8]$$

Míra přímého zvuku (C_7) – toto kritérium je definováno, jako poměr energií přicházejících do 7 ms k energii od 7 ms. Hodnotu udáváme v dB, přičemž hodnoty nad -15 dB připouští dobrou lokalizaci zdroje zvuku. [8]

$$C_7 = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{7 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_7^\infty p^2(t) dt} = 10 \cdot \log \frac{E_7}{E_\infty - E_7}. \quad (13) [8]$$

Míra zřetelnosti (C_{50}) – již dle názvu můžeme soudit, že míra zřetelnosti ukazuje na srozumitelnost mluveného slova. Je definována jako poměr přicházející energie do 50 ms k energii přicházející po 50 ms. Hodnotu udáváme v dB. Pokud u standardní místnosti očekáváme dobrou srozumitelnost mluveného slova, měli bychom u tohoto kritéria dostat výsledek nad hranici 0 dB. Při výsledcích pod -5 dB již prostory musíme označit jako nevhodné pro přednes mluveného slova. [8]

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \cdot \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}. \quad (14) [8]$$

Míra jasnosti (C_{80}) – toto kritérium můžeme nalézt v normě ČSN 73 0525 [X]. Jedná se o kritérium pro hudbu (je definováno pro střed oktávového pásma 1000 Hz) a je definováno jako desetinásobek dekadického logaritmu poměru zvukové energie do 80 ms a po 80 ms. [8]

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \cdot \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}}. \quad (15) [8]$$

Jedná se o velmi důležité kritérium, které určuje, jak dobře lze v daném prostoru rozlišit tóny v rychlých hudebních pasážích. Optimální hodnoty tohoto kritéria se značně odvíjí od hudebního žánru. Obecně lze říci, že za optimální považujeme hodnoty 1 ± 2 dB. Přípustné hodnoty C_{80} pro jednotlivé hudební žánry uvádím v následující tabulce. [8]

Tab. 2.2: Rozsahy přípustných hodnot míry jasnosti C_{80} pro jednotlivé hudební žánry. [8]

Hodnota [dB]	Hudební žánry
0 ± 2	Ideální pro varhanní hudbu, nebo dechové nástroje v pomalém tempu.
2 ± 2	Ideální pro smyčcové nástroje v rychlejším tempu nebo sborový zpěv.
4 ± 2	Ideální pro drnkací a trsací nástroje v rychlejším tempu, žánrově folk a pop.
6 ± 2	Ideální pro perkusní nástroje, rock & roll, současná moderní hudba.
$8 \leq$	Tato hodnota by neměla být překročena.

Objective clarity (D_T) – toto kritérium je definováno jako poměr zvukové energie, která přijde do místa příjmu do času T k celkové energii. [8]

$$D_T = \frac{\int_0^T h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} = \frac{E_T}{E_{\infty}} \quad (16) [8]$$

Zřetelnost (D_{50}) – je definována jako poměr energií časových úseků. [8]

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}}. \quad (17) [8]$$

Strength of arriving energy (G) – je definována jako poměr zvukové energie v daném měřicím místě k energii v referenčním bodě (vzdálenost 10 m), který se vynásobí desetinásobkem dekadického logaritmu. [8]

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}. \quad (18) [8]$$

Míra hlasitosti (G) – „Zakotvená v normě ČSN 73 0525 udává míru hlasitosti. Nejvíce odpovídá subjektivnímu parametru hlasitost.

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} = 10 \cdot \log \frac{E_{\infty}}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt}, \quad (19) [8]$$

kde $p_A(t)$ je impulsová odezva snímaná ve volném poli (přímý zvuk) v referenční vzdálenosti 10 m od všesměrového zdroje zvuku. Jednočíselný údaj míry hlasitosti je zcela nedostatečný. Ve světové literatuře jsou proto užívány míry hlasitosti: GL, GEL, GM, GEM, GH a GEH s indexy

- L (low) značí prostý průměr pro oktaóvová pásma se středními kmitočty 125 a 250 Hz,
- M (mid) prostý průměr pro oktaóvová pásma se středními kmitočty 500 a 1000 Hz,
- H prostý průměr pro oktaóvová pásma se středními kmitočty 500 až 4000 Hz,
- E integrační meze $t_1 = 0$ a $t_2 = 80 \text{ ms}$.“ [8]

Pro praktické výpočty se používá jednodušší vzorec:

$$G_{pred.} = 10 \cdot \log \left(\frac{T_{60}}{V} \right) + 45, \quad (20) [8]$$

kde V je objem prostoru a T_{60} příslušná doba dozvuku.

Center time (t_s) – kritérium čas těžiště impulzové odezvy stejně jako míra jasnosti vypovídá o prostorovém dojmu a jasnosti pro hudbu a mluvené slovo. Hodnoty pro hudbu se v oktaóvovém pásmu 1000 Hz pohybují v rozsahu 70 až 150 ms a hodnoty pro mluvené slovo se v oktaóvovém pásmu 500 Hz až 4000 Hz pohybují v rozsahu 60 až 80 ms. [8]

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{E_{\infty}}. \quad (21) [8]$$

Reverberance Measure (H) – míra doznívání je parametr, který popisuje dozvukový prostorový dojem. Dle vzorce vidíme, že se počítá z dekadického logaritmu poměru zvukové energie od 50 m ku energii přicházející v čase do 50 ms. Počítá se pro oktaóvové pásmo 1000 Hz. Pro zjednodušení výpočtů můžeme využít vzájemných vztahů mezi mírou doznívání H a mírou zřetelnosti C_{50} a také zřetelností D . [8]

$$H = -C_{50}. \quad (22) [8]$$

$$H = 10 \cdot \log \frac{1-D_{50}}{D_{50}}. \quad (23) [8]$$

InterAural Cross correlation Coefficient (IACC) – jedná se o binaurální parametr, který určuje míru korelace signálů, které dorazí do pravého a levého ucha. Měří se pomocí umělé hlavy nebo reálného posluchače, který má u vstupu zvukovou mikrofony. Normalizovanou funkci interaurální vzájemné korelace $IACF$ definujeme jako

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, \quad (24) [8]$$

kde $p(t_l)$ je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a $p(t_r)$ na vstupu pravého ušního kanálu. Samotný činitel interaurální vzájemné korelace $IACC$ se pak počítá podle rovnice [8].

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms} . \quad (25) [8]$$

„Hodnoty $IACCE$ by se měly podle nejprísnejších požadavků v oktávových pásmech 500, 1000 a 2000 Hz pohybovat v rozsahu hodnot 0,4 až 1, kde hodnota 1 znamená maximální rozdílnost zvukových signálů na obou uších, tzn. zvukové pole je maximálně difusní.

Písmena **E**, **L** a **A** udávají z jakých integračních časových mezí se určí parametr $IACC$

$IACC_E$	$t_1 = 0 \text{ ms}$	$t_2 = 80 \text{ ms}$
$IACC_L$	$t_1 = 80 \text{ ms}$	$t_2 = 1000 \text{ ms}$
$IACC_A$	$t_1 = 0 \text{ ms}$	$t_2 = 1000 \text{ ms}$

Číslo za písmenem udává pro jaká třetinooktávová pásma je hodnota $IACC$ určena.

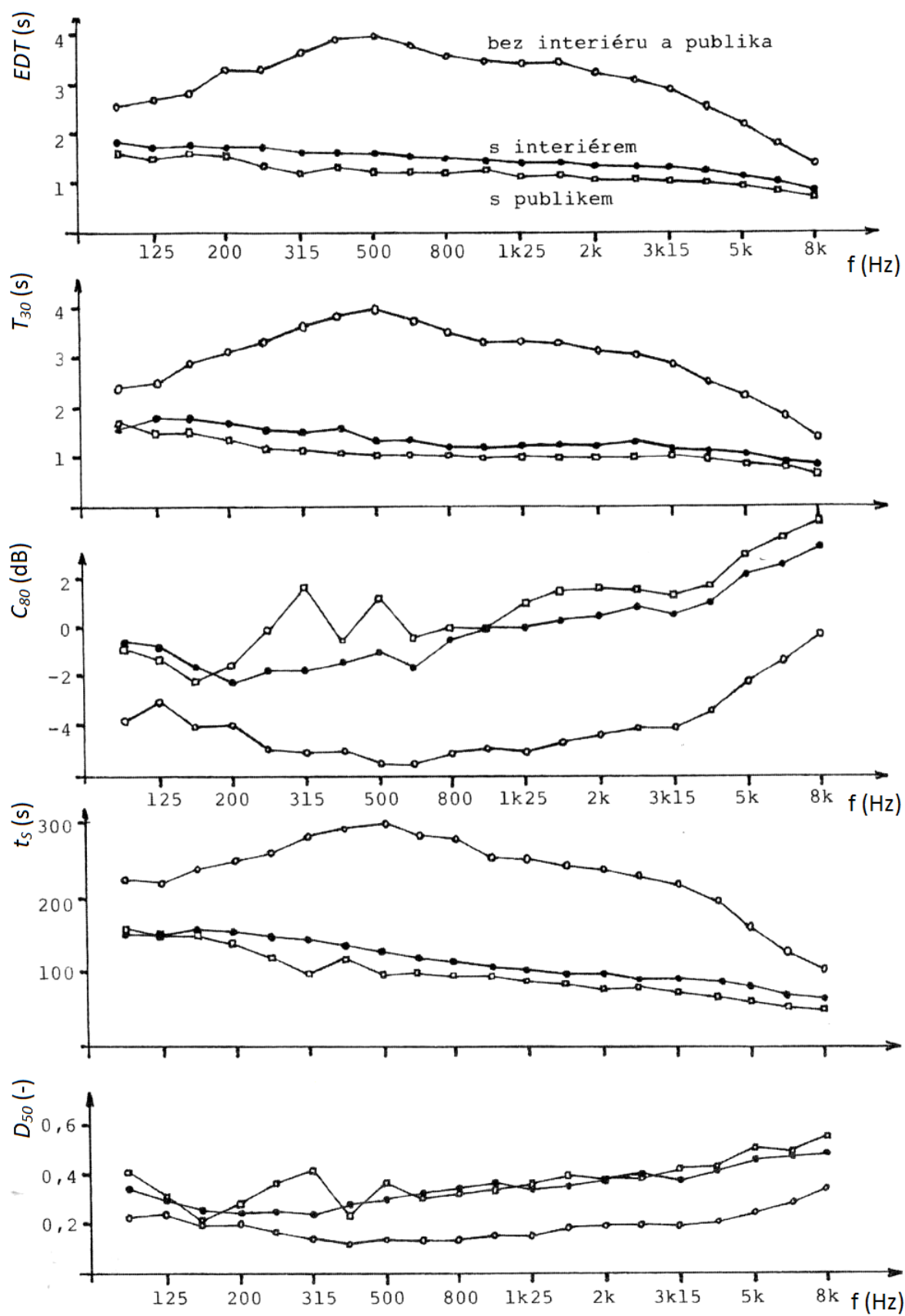
3	500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz
4	500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz a 4000 Hz

Nejlépe hodnocené sály mají hodnoty $[1-IACCE3]$ okolo 0,6. „ [8]

Lateral Energy Fraction (LF) – je kritérium, které se měří pomocí bi-directional mikrofónů, které mají tzv. osmičkovou charakteristiku. Optimální hodnoty tohoto parametru se pohybují mezi 0,1 a 0,25.

$$LF = \frac{\int_0^{80\text{ms}} p_8^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt} = \frac{E_{80 \text{ Bi}} - E_{5 \text{ Bi}}}{E_{80}} . \quad (26) [8]$$

Jak již bylo řečeno v Kap. 2.5, délka doby dozvuku se mění v závislosti na tom, zda je měřena v prázdném sále nebo v sále plném publika. Podobně se mění také ostatní kritéria. Na obrázku níže můžeme vidět změnu EDT , T_{30} , C_{80} , t_5 a D_{50} v závislosti na frekvenci, obsazení sálu, před a po interiérových úpravách. [4]



Obr. 5: Vliv interiéru a publika na akustické vlastnosti refektáře MFF UK [4]

2.8 Jednočíselná klasifikace akustické kvality koncertních sálů

Všechna výše zmíněná kritéria kvality koncertních sálů jsou pro klasifikaci velmi důležitá, sama o sobě však nemají příliš velkou vypovídací hodnotu. Je potřeba ze zjištěných hodnot objektivních parametrů zjistit jednočíselnou známku, abychom mohli ohodnotit celkovou akustiku sálu, ne pouze jeho jednotlivé parametry.

Jako první přišel Yoichi Ando s jednoduchým vzorcem pro výpočet škálové hodnoty jednorozměrné subjektivní odpovědi. [8]

$$S = \sum S_i, \quad (30) [8]$$

kde S_i je subjektivní preference jednotlivých parametrů zvukového pole. Dále určil, že pro optimální hodnoty bude hodnota každé subjektivní preference nulová, což nás nutí vyjadřovat atributy v logaritmických souřadnicích. Jednotlivé subjektivní preference vypočítáme jako [8]

$$S_i = -a_i \sqrt{|x_i|^3}, \quad (31) [8]$$

kde a_i jsou váhové koeficienty jednotlivých atributů a x_i hodnoty kritérií příslušných parametrů. Na Andovu práci dále navázal Leo Beranek, který určil 6 základních kategorií pro hodnocení kvality koncertních sálů (C, C+, B, B+, D, D+, A, A+), přičemž známka C znamená: „dostatečné“ a známka A+: „dokonalé“. [8]

Pro celkový výpočet kvality akustiky koncertního sálu potom funguje sumační vzorec:

$$S = \sum S_i = \sum -a_i \sqrt{|x_i|^3}. \quad (32) [8]$$

„Pro predikci subjektivně hodnocené akustické kvality koncertního sálu platí následující meze (s pravděpodobností 95%):

Objektivní rating sálu	Subjektivní rank
$0.0 > S > -0.3$	A+
$-0.3 > S > -0.6$	A
$-0.6 > S > -0.9$	B+
$-0.9 > S > -1.2$	B
$-1.2 > S$	C,, [8]

2.9 Sál Divadla na Orlí

Protože v praktické části práce jsou porovnávány a vyhodnocovány výsledné hodnoty objektivních kritérií pro sál Divadla na Orlí, je nutné uvést alespoň základní údaje o tomto sále. Stavba Divadla na Orlí byla zahájena v roce 2010 a ukončena v roce 2012, financována byla z prostředků Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR. Soutěž na dodavatele stavby vyhrálo sdružení firem UNISTAV, a. s. a OHL ŽS, a. s. Jedná se o divadelní scénu Janáčkovy akademie múzických umění v Brně, která by měla sloužit především pro přípravu studentů JAMU na jejich profesionální kariéru. V divadle jsou prováděny především opery a muzikály, ale divadlo se pronajímá i ke komerčním účelům. Zajímavostí divadelního sálu je jeho variabilita. Díky pohyblivým částem lze v divadle vytvořit prostor klasické kukátkové scény, ale také je možné měnit poměry jeviště a hlediště. V divadle je možné uvést povrch hlediště i jeviště do jedné roviny, což umožňuje další využití sálu. [9]

Tab. 2.3: Technické parametry sálu Divadla na Orlí. [9]

Rozměry	21 x 12 x 6,5 m
Objem	1638 m ³
Objem na osobu	10,92 m ³
Kapacita	150 osob

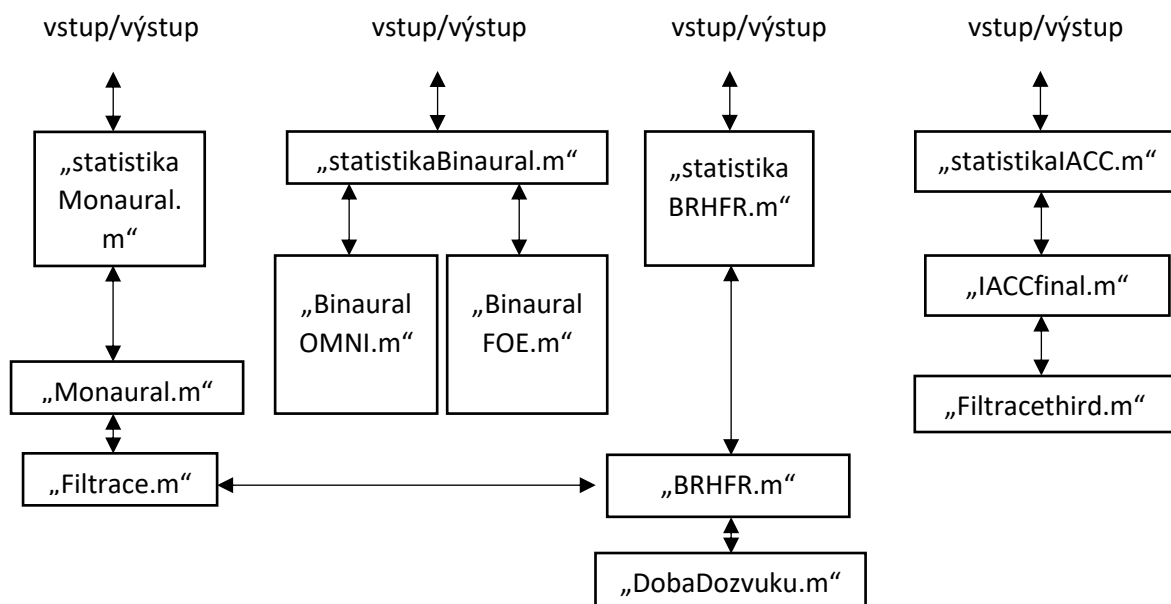
3 Praktická část

3.1 Matlab

Veškeré výpočty a vizualizace probíhají v programovém prostředí Matlab, což je multiplatformní software pro vědeckotechnické výpočty. Jeho první verze pochází již ze sedmdesátých let a sloužila pouze pro matematické výpočty. Postupem času se možnosti Matlabu značně rozšířily a nyní je v něm možné provádět náročné výpočty, vizualizace, simulace nebo programování uživatelského prostředí a grafiky. Pro účely této semestrální práce se tak jedná o vhodný nástroj.

S vývojem prostředí Matlab začal v roce 1970 profesor Cleve Moler z katedry informačních technologií na Univerzitě v Novém Mexiku. Ten se snažil svým studentům umožnit využívání softwarových knihoven LINPACK a EISPACK bez nutnosti ovládnutí programovacího jazyka Fortran. V roce 1983 se o Matlab začal zajímat Jack Little, který jej později přepsal do jazyka C, přidal další funkce a společně s Molerem a Stevem Bergertem založil společnost MathWorks, což byl začátek komerčního a mnohem širšího využívání Matlabu. V dnešní době má i Matlab několik komerčních i nekomerčních alternativ. Z placených produktů je to například Mathematica nebo Maple. Open source varianty jsou GNU Octave nebo Scilab. [10]

3.2 Rozdělení programu pro výpočet objektivních kritérií



Obr. 6: Grafické znázornění stromu funkcí pro výpočet objektivních kritérií

Na grafickém stromu výše (Obr. 6) lze vidět rozdělení jednotlivých výpočtů do různých funkcí, které se navzájem volají. Například po spuštění skriptu „statistikaMonaural.m“ se volá funkce „Monaural.m“, která pro své výpočty využívá funkci „Filtrace.m“. Funkce „statistikaBinaural.m“ volá funkce

„BinauralOMNI.m“ a „BinauralFOE.m“. Další skript s názvem „statistikaBRHFR.m“ ke svému chodu potřebuje blok „BRHFR.m“, ten si dále volá funkce „Filtrace.m“ a „DobaDozvuku.m“. Výpočet kritéria IACC probíhá pomocí skriptu „statistikaIACC.m“, který si volá funkci „IACCfinal.m“ a ten využívá další funkci „Filtracethird.m“. Dále je pak nutno k jednotlivým blokům přiřadit kritéria, která počítají.

Detailnější diagramy některých složitějších funkcí jsou přiloženy v příloze.

3.2.1 „Monaural.m“

Ve funkci „Monaural.m“ najdeme vztahy pro výpočet kritérií doby dozvuku RT , počáteční doby dozvuku EDT , míry přímého zvuku C_7 , míry zřetelnosti C_{50} a míry jasnosti C_{80} , dále v tomto souboru nechybí vzorce pro výpočet zřetelnosti D_{50} , času těžiště impulsové odezvy t_s nebo míry dozívání H . Vstupními daty pro tuto funkci je impulsová odezva a její vzorkovací frekvence.

3.2.2 „statistikaMonaural.m“

Pro lepší možnosti vyhodnocení naměřených a vypočtených dat slouží soubor „statistikaMonaural.m“, který po svém spuštění otevře dialogové okno pro nahrání impulsových odezev. Následně data zpracovává pomocí výše zmíněné funkce „Monaural.m“. Počítá průměr a rozptyl výsledných hodnot a také zobrazí výsledné hodnocení těchto hodnot. Buďto hlásí „Hodnoty jsou vyhovující“ nebo „Hodnoty nejsou vyhovující“ a to již v případě, kdy jedno z kritérií neodpovídá předepsaným intervalům.

3.2.3 „BinauralOMNI.m“ a „BinauralFOE.m“

V dalším souboru s názvem „BinauralOMNI.m“ se počítá část hodnot pro kritérium *Lateral Energy Fraction*, které vychází z impulsových odezev naměřených pomocí bi-directional mikrofónů. Používá se tedy vždy stopa naměřená všesměrovým mikrofónem („BinauralOMNI.m“) a stopa naměřená mikrofónem s osmičkovou charakteristikou („BinauralFOE.m“). Na začátku výpočtu se opět uřízne začátek impulsní odezvy, aby vzorek začínal přímou vlnou. Následně pomocí příkazů pro sumu a kumulativní sumu (sum a cumsum) dojde k výpočtu energií, konkrétně E_{80} u všesměrového mikrofónu a E_{80} a E_5 u osmičkového mikrofónu. Tyto hodnoty následně dosazují do vzorce (26).

3.2.4 „statistikaBinaural.m“

Také pro výpočet statistických hodnot a zhodnocení výsledků binaurálního kritéria *Lateral Energy Fraction*, které vychází z impulsových charakteristik z mikrofónů s osmičkovou charakteristikou a mikrofónů s všesměrovou charakteristikou byl zpracován další soubor s názvem „statistikaBinaural.m“. Po spuštění se (stejně jako v „statistikaMonaural.m“) vyvolá dialogové okno pro výběr naměřených zvukových souborů. Nejprve je to dialogové okno pro výběr všesměrových vzorků a poté pro výběr vzorků z osmičkových mikrofónů. Soubor si volá funkce „BinauralOMNI.m“ a „BinauralFOE.m“ v závislosti na tom, které hodnoty počítá. Následně pak počítá kritérium LF , jeho průměr i rozptyl. Dále také vyhodnotí, zda jsou hodnoty vyhovující nebo ne.

3.2.5 „BRHFR.m“

V skriptu s názvem „BRHFR.m“ je uchován kód pro výpočet parametrů míry podpory basových frekvencí BR a míry podpory vysokých frekvencí HFR . Tyto dvě kritéria jsou v samostatném souboru, protože vyžadují filtraci a zařazení k ostatním parametrům by bylo chaotické. Na začátku tohoto souboru je načtena impulsová odezva z všesměrového mikrofónu pomocí příkazu audioread, u kterého je následně oříznut začátek, aby začínal přímou vlnou. Poté probíhá filtrace pro jednotlivá oktávová pásma 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz a 1000 Hz. Filtrace probíhá pomocí samostatně definované funkce s názvem „Filtrace.m“, uvnitř které je navržen filtr pomocí příkazu fdesign.octave. Ten má definovaný řád, střední kmitočet a vzorkovací frekvenci. Následně je z vyfiltrovaného signálu vypočítána doba dozvuku RT pomocí další funkce s názvem „DobaDozvuku.m“.

3.2.6 „statistikaBRHFR.m“

Pro lepší práci s výpočty ve funkci „BRHFR.m“ slouží skript „statistikaBRHFR.m“, jehož spuštěním se spouští celý výpočet. Na začátku se otevře dialogové okno pro výběr souborů, tyto soubory projdou výpočtem v „BRHFR.m“, dále se vypočítá průměr výsledků z funkce „BRHFR.m“ a jejich rozptyl. Poté skript vypíše, zdali jsou hodnoty vyhovující nebo nikoliv.

3.2.7 „IACCfinal.m“

Posledním důležitým souborem je funkce „IACCfinal.m“, která slouží pro výpočet činitele interaurální vzájemné korelace. Vstupem je stereofonní impulsová odezva, která byla naměřena pomocí umělého torza a mikrofónů v obou uších. Pomocí funkce „IACCfinal.m“ dochází k výpočtu parametru $IACC$ pro tři třetinooktávová pásma (500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz). Jedná se o výpočet typu $IACC_{E3}$, což znamená, že časové integrační meze jsou od 0 do 80 ms.

3.2.8 „statistikaIACC.m“

U statistického souboru pro kritérium $IACC$ postupují velmi podobně, jako u statistických výpočtů pro ostatní monaurální kritéria. Nejprve se otevře dialogové okno pro výběr zvukových souborů, které následně projdou výpočty funkce „IACCfinal.m“, statistický soubor spočítá průměr a rozptyl, následně určí, zda jsou hodnoty vyhovující, nebo nejsou.

3.2.9 „Filtrace.m“

Funkce filtrace slouží pro filtraci do oktávových pásem. Jejím vstupem je zvukový soubor, vzorkovací frekvence, řád filtrů a střední kmitočty. Pro samotnou filtraci je použit příkaz `fdesign.octave`, který slouží pro návrh filtru. Funkce vykresluje signál před a po filtraci.

3.2.10 „Filtracethird.m“

Ve funkci „Filtracethird.m“ probíhá velmi podobný návrh filtru, jako ve funkci „Filtrace.m“, rozdílem je, že tento filtr není oktávový, ale je třetinooktávový.

3.2.11 „DobaDozvuku.m“

V této funkci dochází k výpočtu doby dozvuku T_{60} , stejně jako je tomu ve funkci „Monaural.m“. Kvůli kritériím BR a HFR , kde se počítají doby dozvuku pro různá oktávová pásma, je potřeba mít tento výpočet i ve zvláštní funkci. Postup je stejný jako ve funkci „Monaural.m“.

3.3 Programy pro výpočet kmitočtové odezvy a impulsové odezvy

Výpočet a vykreslení kmitočtové odezvy probíhá pomocí skriptu s názvem „freqresp.m“. Jeho vstupem je pouze zvukový signál. Výstupem je pak grafické zobrazení modulové a fázové kmitočtové odezvy.

Pro výpočet impulsové odezvy slouží skript s názvem „impresp.m“. Vstupními daty je vstupní signál a výstupní signál systému. Výstupem je grafické zobrazení obou signálů a také impulsové odezvy, která je pomocí nich počítána.

4 Popis algoritmu výpočtů jednotlivých kritérií

4.1 Popis algoritmu výpočtu monaurálních kritérií

Na počátku funkce pro výpočet monaurálních kritérií se definují její vstupy, což je samotný zvukový signál a jeho vzorkovací frekvence. Výstupem je vektor „vysledky“, v kterém jsou uloženy jednotlivá objektivní kritéria. Protože pro výpočty tohoto typu požadujeme monofonní impulsové charakteristiky, hned na začátku se případně odstraní druhý kanál. Následně se ořezává začátek impulsní odezvy tak, aby začínala přímou vlnou. To se děje pomocí příkazu `find`, který najde maximum signálu a od bodu 0 do prvního maxima signál ořízne.

Dále se načítá délka zvukového signálu do proměnné N pomocí příkazu `length` a počítají se energie zvukového signálu pomocí příkazů `sum` a `cumsum` pro sumu a kumulativní sumu. Po těchto výpočtech následuje výpočet dozvukového poklesu v lineární i logaritmické podobě (7). Následně se počítá celkový čas zvukového signálu, generují se vektory pomocí příkazu `linspace`, prokládají se dozvukové poklesy a počítají se koeficienty pro rovnice přímek. Jedna z přímek je pro kritérium T_{60} a prokládá se dozvukovým poklesem v intervalu 0 až 0,2 s a druhá pro kritérium EDT se prokládá v intervalu 0 až 0,1 s.

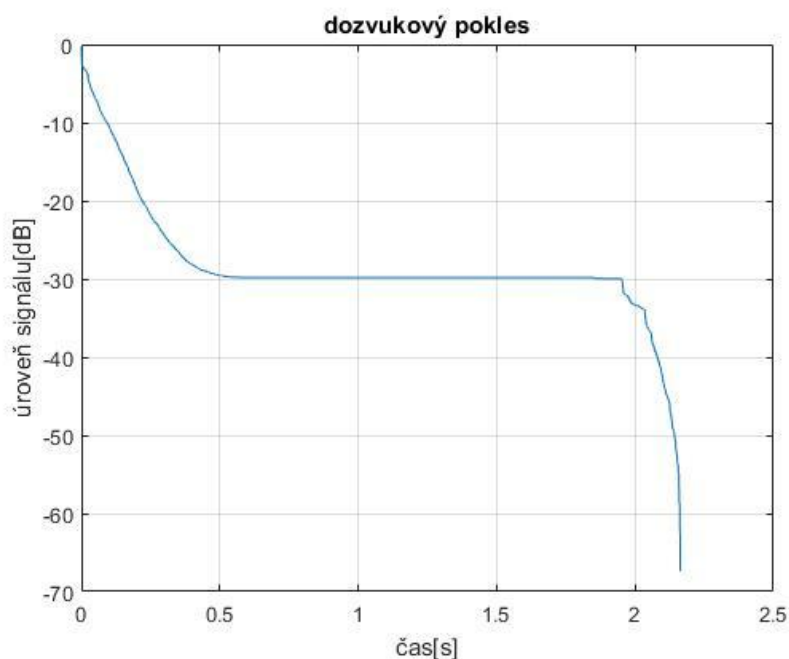
Dále je potřeba z přímek, které jsou proloženy dozvukovým poklesem, zjistit čas, kdy úroveň signálu klesne pod - 60 dB. To je ošetřeno podmínkou `if`, který hledá bod na přímce pod hranicí - 60 dB. Pokud jej najde, zapíše jej jako index a následně jeho hodnotu zapíše do proměnné T_{60} (to stejné platí i pro EDT). Pokud jej nenajde, dopočítá si hodnotu T_{60} (nebo EDT) z rovnice přímky, kterou je proložen dozvukový pokles.

Po vypočtení hodnot kritérií T_{60} a EDT následuje výpočet křivky pro kritérium CT (12), z které následně odečítáme hodnoty C_7 a C_{50} pro časy 7 ms a 50 ms. U kritéria C_{80} se navíc musí provést filtrace pro oktaóvové pásmo 1000 Hz, což se děje pomocí jiné funkce „`Filtrace.m`“.

Následuje kritérium DT (16), kdy se opět počítá nejprve jako křivka a poté se z ní odečítá konkrétní hodnot D_{50} v čase 50 ms. Dalším kritériem je tzv. míra dozívání (H), pro kterou je definováno několik způsobů výpočtů, ale jedná se o převrácenou hodnotu kritéria C_{50} , tudíž lze využít toho, že toto kritérium je již vypočítáno a pouze se změní znaménko.

Posledním kritériem v tomto souboru je tzv. čas těžiště impulsové odezvy (t_s), který se vypočítá dle vztahu (21). Před samotným výpočtem je však nutno signál filtrovat pro oktaóvové pásmo 1000 Hz, což se opět provádí ve funkci „`Filtrace.m`“, uvnitř které je navržen filtr pomocí příkazu „`fdesign.octave`“ s parametry proměnné h , vzorkovací frekvencí fs , řádem filtru N a středním kmitočtem f . Pro výpočet kritéria „center time“ je použit řád filtru 6 a střední kmitočet 1000 Hz.

Spolu s monaurálními kritérii je výstupem tohoto souboru také vykreslený graf pro dozvukový pokles, jaký můžeme vidět níže.



Obr. 7: Dozvukový pokles

4.2 Popis statistiky a vyhodnocení monaurálních kritérií

Na počátku algoritmu pro statistické zpracování a vyhodnocení výsledků monaurálních kritérií se pomocí příkazu `uigetfile` otevírá dialogové okno pro výběr zvukových souborů ke zpracování. Pokud uživatel nevybere žádný soubor, vypíše se hláška „...cancelled“.

V další části se pomocí příkazu `iscellstr` zjišťuje, zdali uživatel nenahrál pouze jeden soubor a pokud ano, převede se na strukturu s jedním názvem. Dále se pomocí příkazu `length` zjišťuje počet nahraných souborů a pomocí příkazu `zeros` se vytváří prázdná matice, která má dva sloupce a počet řádků shodný s počtem nahraných souborů.

Následuje cyklus `for`, uvnitř kterého se nahrávají zvukové soubory pomocí příkazu `audioread` a volá se funkce „Monaural.m“, která dané soubory zpracovává. Výsledky z této funkce se ukládají do prázdné matice.

Po ukončení cyklu `for` následuje výpočet průměru a rozptylu pomocí příkazů `mean` a `var`. Následně se prostřednictvím cyklů `if` zjišťuje, zdali některá z hodnot nevybočuje z očekávaného rozmezí a pokud ano, vypíše se hláška „Hodnoty nejsou vyhovující“, a to i v případě, že nevyhovující je jen jedna z hodnot. Pokud všechny hodnoty odpovídají očekávanému rozmezí, vypíše se hláška „Hodnoty jsou vyhovující“. Na závěr programu se vždy vypíší vypočítané hodnoty jednotlivých kritérií.

4.3 Popis algoritmu výpočtů binaurálního kritéria LF

Pro výpočet kritéria *Lateral Energy Fraction (LR)* jsem vytvořil další dvě funkce s názvem „BinauralOMNI.m“ a „BinauraFOE.m“, protože pro výpočet *Lateral Energy Fraction* je potřeba impulsových charakteristik z bi-directional mikrofonů, používám tedy vždy vzorek z mikrofonu s osmičkovou charakteristikou a s všesměrovou charakteristikou.

Funkce „BinauralFOE.m“ slouží pro výpočty energií z osmičkových mikrofonů. Vstupní data této funkce jsou samotný signál `h8` a vzorkovací frekvence `fs8`, výstupem je pak vektor „výsledky“, v kterém jsou uloženy hodnoty energie do 80 ms a do 5 ms z všesměrových mikrofonů. Na začátku funkce ořezávám signál pomocí příkazu `find`, kterým hledám přímou vlnu, po kterou se signál ořeže. Následně počítám energii impulsové odezvy pomocí příkazu `cumsum` pro kumulační součet. Poté počítám energie pro časy 80 ms a 5 ms tím, že násobím vzorkovací frekvenci číslem 0,08 a 0,005 a v těchto bodech následně odečítám jednotlivé energie. Jako poslední se ukládají obě hodnoty do vektoru výsledky.

Funkce „BinauralOMNI.m“ má na vstupu impulsovou odezvu `h0` a vzorkovací frekvenci `fs0`, výstupem je pak energie v 80 ms `E80`. Slouží pro výpočet energie z všesměrových mikrofonů v čase 80 ms. Opět nejprve hledám přímou vlnu pomocí příkazu `find` a následně signál ořezávám, aby začínal přímou vlnou. Také v tomto případě používám příkaz `cumsum` pro výpočet energie a následně odečítám její hodnotu v 80 ms vynásobením vzorkovací frekvence a číslem 0,08.

4.4 Popis algoritmu statistiky a vyhodnocení výpočtů binaurálního kritéria LF

Pro zpracování většího množství impulsových odezev je i u kritéria *Lateral Energy Fraction* nutno používat další skript s označením „statistikaBinaural.m“. Opět zde používám příkaz `uigetfile` pro zobrazení dialogového okna pro výběr impulsových charakteristik, nyní se však toto okno otevírá dvakrát, přičemž poprvé je nutno nahrát pouze charakteristiky z všesměrových mikrofonů a po druhé charakteristiky z osmičkových mikrofonů. Pokud nejsou vybrány žádné soubory, zobrazí se hláška „...cancelled“ a tím se zruší výpočet. Dále je ošetřeno i nahrání pouze jedné charakteristiky, jejíž název se převede na strukturu s jedním záznamem. Následně do proměnné `multiselect` ukládám počet vybraných zvukových souborů a vytvářím prázdnou matici pro pozdější ukládání vypočtených hodnot energií. Samotné načtení audio souborů probíhá pomocí příkazu `audioread`, který je uvnitř cyklu `for`.

V tomto cyklu se načítají i jednotlivé výsledky funkce „BinauralOMNI.m“ do prázdné matice, kterou jsem si vytvořil.

Velmi podobně vypadá i výběr zvukových vzorků z osmičkových mikrofónů. Rozdílem je pouze to, že zde používám funkci „BinauralFOE.m“, která má na výstupu dvě hodnoty (energii pro 80 ms a 5 ms). Výsledky se tedy ukládají do matice výsledky, která má dva sloupce a počet řádků je takový, jaký je počet nahraných zvukových souborů.

Po ukončení cyklu for následuje zjištění počtu uložených hodnot, který ukládám do proměnné *p* a používám k tomu příkaz `length`. Opět vytvářím prázdnou matici *LF* s počtem řádků *p* a jedním sloupcem. Následně je v cyklu for uložen výpočet jednotlivých hodnot kritéria *LF* dle výše zmíněného vztahu (26).

Pomocí příkazů `mean` a `var` poté počítám průměr a rozptyl hodnot *Lateral Energy Fraction*, které jsou uloženy v matici *LF*. Na závěr je ještě podmínka `if`, který na základě toho, zda je průměrná hodnota kritéria *Lateral Energy Fraction* v rozmezí 0.1 až 0.25 vypíše, zdali je výsledná hodnota vyhovující nebo ne.

4.5 Popis algoritmu výpočtů kritérií BR a HFR

Jak již bylo řečeno, pro výpočet míry podpory hlubokých tónů doznívání sálu a míry podpory vysokých tónů doznívání sálu, jsem použil další funkci. Tato funkce se jmenuje „BRHFR.m“, jejím vstupem je impulsová odezva *h* a vzorkovací frekvence *fs*. Výstupy jsou hodnoty kritérií *BR* a *HFR*.

Na počátku funkce vybírám pouze jeden kanál, v případě, kdy je nahraný soubor wav stereofonní. Dále opět uřezávám počátek signálu do první vlny pomocí hledání maxima, které si označím indexem a následně signál ořežu v rozsahu `index:end`.

Jako první počítám kritérium *BR*, pro které je potřeba získat čtyři doby dozvuku pro oktávová pásma 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz a 1000 Hz. Nejprve tedy filtruji impulsovou odezvu pomocí funkce „Filtrace.m“, jejíž vstupem je impulsová odezva, vzorkovací kmitočet, řád filtru a střední kmitočet. Jediným výstupem je vyfiltrovaný signál. Ten následně posílám do další funkce s názvem „DobaDozvuku.m“, která má na vstupu právě onen filtrovaný signál a vzorkovací kmitočet, na výstupu je pak vypočítaná doba dozvuku z filtrované impulsové odezvy vždy pro daný mezní kmitočet. Následně jsou tyto doby dozvuku dosazeny do vztahu (10) a vypočteny. Podobně pak postupuji také u výpočtu kritéria *HFR*, u kterého je opět potřeba doby dozvuku pro kmitočty 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz a 4000 Hz. Protože doby dozvuku pro kmitočty 500 a 1000 Hz jsem počítal již pro kritérium *BR*, počítám dále pouze doby dozvuku v oktávových pásmech 2000 Hz a 4000 Hz. Výsledky opět získávám pomocí daného vztahu (11).

4.6 Popis algoritmu statistiky a vyhodnocení pro kritéria BR a HFR

Na počátku algoritmu pro statistické zpracování a vyhodnocení hodnot kritérií *BR* a *HFR* se pomocí příkazu `uigetfile` otevírá dialogové okno, prostřednictvím kterého uživatel volí soubory pro zpracování. Pokud uživatel žádný soubor nevybere, výběr se zruší a vypíše se hláška „...cancelled“ pomocí podmínky `if`. Následně je ošetřeno i to, že uživatel vybere pouze jeden soubor. Pomocí příkazu `iscellstr` se zjistí, zdali je proměnná buňka nebo řetězec a pokud je to buňka, převede se na řetězec s jedním záznamem.

Dále pomocí příkazu `length` zjišťuji počet zvolených souborů a pomocí příkazu `zeros` vytvářím prázdnou matici, která má dva sloupce a počet řádků takový, jaký je počet nahraných souborů. Následuje cyklus

for, uvnitř kterého nahrávám soubory pomocí příkazu audioread, volám si funkci „BRHFR.m“, jejíž výsledky poté zapisuji do prázdné matice, kterou jsem vytvořil před cyklem for.

Po ukončení cyklu for se počítá průměr hodnot pomocí příkazu mean a také rozptyl pomocí příkazu var. Následně program pomocí podmínky if zjišťuje, zdali hodnoty spadají do požadovaného rozmezí a na základě výsledků porovnání vypíše slovní komentář: „Hodnoty BR jsou vyhovující“ / „Hodnoty BR nejsou vyhovující“. Po slovním komentáři program vypíše konkrétní hodnoty kritérií *BR* a *HFR*.

4.7 Popis algoritmu výpočtů IACC

Pro výpočet binaurálního kritéria *Interaural Cross Correlation Coefficient IACC* jsem si vytvořil funkci s názvem „IACCfinal.m“, jejímž vstupem je impulsová odezva *h* a její vzorkovací frekvence *fs*. Výstupem je pak vektor „výsledky“, do kterého se ukládá výsledná hodnota *IACC* pro třetinooktávové pásma 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz. Protože se pro výpočet kritéria *IACC* používá stereofonní impulsová odezva naměřená pomocí umělého torza, které má mikrofony v uších, hned na začátku si jednotlivé kanály rozdělím do dvou proměnných. Poté již pracuji s každým kanálem zvlášť, opět signál ořezávám, aby začínal přímou vlnou a poté jej ořezávám do 80 ms, což jsou integrační časové meze pro parametr $IACC_E$.

Následně je nutno signály filtrovat, což provádím pomocí funkce „Filtracethird.m“, kterou si postupně volám a provádím třetinooktávovou filtraci pro frekvence 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz. Pomocí příkazu cumsum následně počítám integrály, které najdeme v jmenovateli vztahu pro výpočet *IACF* (24). Čítec počítám jako korelaci levého a pravého kanálu impulsové odezvy. Následně z vektoru hodnot *IACF* vyřezávám interval 1 ms v polovině a v tomto intervalu hledám maximum pomocí funkce max. Výsledná hodnota *IACC* je tedy vypočtena podle vzorce (25).

Stejný postup používám i pro další dvě frekvence 1000 Hz a 2000 Hz. Na závěr se hodnoty *IACC* pro všechny tři frekvence vypíší do proměnné s názvem výsledky.

4.8 Popis algoritmu statistiky a vyhodnocení pro IACC

Protože samotné hodnoty *IACC* pro jednotlivé frekvence nemají velkou vypovídající hodnotu, je vždy nutné používat více naměřených vzorků a ty průměrovat. Tuto část úkolu zpracovává mfile s názvem „statistikaIACC.m“, který ve výsledku vypíše i výsledný verdikt, zdali jsou hodnoty vyhovující nebo ne. Na začátku veškerých výpočtů je nutné načíst impulsové charakteristiky, z kterých chceme kritérium *IACC* určovat. Pomocí funkce uigetfile se zobrazí dialogové okno pro výběr souborů. Při stisku „esc“ se dialogové okno zavře. Pokud uživatel nahraje pouze jeden soubor, pomocí příkazu iscellstr to program rozpozná, a název se převede na strukturu s jedním záznamem. Dále se pomocí příkazu length zjišťuje počet souborů, který se ukládá do proměnné multiselect. Pomocí příkazu zeros pak vytvářím nulovou matici s počtem řádků multiselect a počtem sloupců 3, protože počítáme parametr *IACC* pro tři třetinooktávová pásma.

Dále je pomocí cyklu for zajištěno postupné načítání souborů, kdy konečný počet souborů nám označuje proměnná multiselect a samotné nahrání impulsové charakteristiky je zajištěno příkazem audioread. Pomocí funkce size dále zjišťuji délku souborů a počet kanálů. Jako poslední bod zapisuji do již vytvořené nulové matice výsledky výpočtů ze souboru „IACCfinal.m“.

V tomto bodě se tedy vypočtené výsledky zapíší do matice, nicméně je potřeba z nich vypočítat průměr a rozptyl. To je provedeno pomocí příkazů mean a var. Na závěr se pomocí podmínky if program rozhoduje, zdali všechny hodnoty odpovídají požadované hodnotě 0,4 až 1. V případě, že se jakákoliv z hodnot do požadovaného intervalu nevejde, program zobrazí hlášku „Hodnoty nejsou vyhovující“. V opačném případě program vypíše „Hodnoty jsou vyhovující“.

4.9 Popis algoritmu pro výpočet kmitočtové odezvy

Kmitočtová odezva se počítá pomocí skriptu „freqresp.m“, jehož vstupem je zvukový signál. Na ten je aplikována rychlá furierova transformace (FFT), která v tomto případě slouží k výpočtu kmitočtové odezvy z impulsové odezvy. Následně se z výsledku FFT počítá modul a fáze. Výstupem tohoto skriptu je dvojice grafů, na kterých je zobrazena modulová a fázová kmitočtová odezva.

4.10 Popis algoritmu pro výpočet impulsové odezvy

Pro výpočet impulsové odezvy slouží skript s názvem „impresp.m“. Na počátku jsou definována vstupní data v podobě vstupního signálu systému a výstupního signálu systému. Následně je na oba tyto signály aplikována FFT. Dále je nutno podělit výstupní signál se vstupním signálem a na výsledek tohoto dělení použít zpětnou furierovu transformaci (IFFT). Pak už zbývá pouze vykreslit tři průběhy: vstupní signál, výstupní signál a impulsovou odezvu.

5 Zhodnocení výsledků

Z časových důvodů bohužel nebylo provedeno měření vlastních zvukových vzorků pro výpočet objektivních kritérií v sále divadla Na Orlí. Pro demonstraci funkčnosti programu byla použita data, která byla v daných prostorách naměřena v minulých letech, to s sebou však přineslo určité nečekané komplikace.

Tou nejzávažnější je, že detailní zpracování dat pro kritérium *Lateral Fraction* není možné, protože nejsou známy citlivosti měřících mikrofónů, což popisují také v kapitole 5.2. Dalším problémem je nemožnost orientace v datech pro výpočet kritéria *IACC*. Naměřené vzorky pro operu Impresário nejsou popsány, tudíž není možné dané vzorky zařadit do správných konfigurací sálu. Pro kritérium *IACC* tedy byly zpracovány pouze vzorky k opeře Mirandolina. Poslední nepříjemností je, že pro kritérium míry jasnosti (C_{80}) nelze určit výsledné hodnoty, protože poklesová křivka v čase 80 ms se již nachází v šumu pozadí a také šumu měřícího řetězce.

5.1 Zhodnocení výsledků monaurálních kritérií

Pro výpočet monaurálních kritérií byly použity naměřené zvukové vzorky pro čtyři konfigurace sálu při scénickém rozestavení k opeře Impresário a tři konfigurace sálu k opeře Mirandolina. Mění se zdroj zvuku i pozice měřících mikrofónů. Výstupem jsou průměry výsledných hodnot objektivních kritérií T_{60} , EDT , C_7 , C_{50} , D_{50} , t_s , H a jejich rozptyly.

5.1.1 operní představení Impresário

Tab. 5.1: Výsledné hodnoty monaurálních kritérií pro čtyři konfigurace sálu při scénickém řešení pro operu Impresário

Monaurální kritéria: operní představení Impresário						
normální rozestavení				šály		
objektivní kritéria	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
T_{60}	0,8386 s	0,0510 s	vyhovuje	0,7808 s	0,0003 s	vyhovuje
EDT	0,7651 s	0,0499 s	vyhovuje	0,7017 s	0,0011 s	vyhovuje

C_7	13,8274 dB	13,2853 dB	vyhovuje	-13,7177 dB	9,9532 dB	vyhovuje
C_{50}	5,7865 dB	2,3060 dB	vyhovuje	6,9194 dB	1,8298 dB	vyhovuje
D_{50}	0,6365	0,0385	vyhovuje	0,6612	0,0009	vyhovuje
t_s	0,0938 s	0,0007 s	vyhovuje	0,0947 s	0,0000 s	vyhovuje
H	-5,7865 dB	1,8107	průměrný dojem prostorovosti	-6,9194 dB	1,8298 dB	průměrný dojem prostorovosti
bez pohltivých prvků				vyjetý stůl		
objektivní kritéria	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
T_{60}	1,0393 s	0,0194 s	vyhovuje	1,2882 s	0,0385 s	vyhovuje
EDT	0,8642 s	0,0034 s	vyhovuje	0,9675 s	0,0062 s	vyhovuje
C_7	-13,8985 dB	11,6521 dB	vyhovuje	-14,3107 dB	13,0896 dB	vyhovuje
C_{50}	4,8609 dB	1,6027 dB	vyhovuje	3,6706 dB	2,2033 dB	vyhovuje
D_{50}	0,6160	0,0009	vyhovuje	0,5894	0,0013	vyhovuje
t_s	0,1242 s	0,0000 s	vyhovuje	0,1364 s	0,0001 s	vyhovuje
H	-4,8609 dB	1,6027 dB	průměrný dojem prostorovosti	-3,6706 dB	2,2033 dB	průměrný dojem prostorovosti

T60 a EDT

Z tabulky Tab. 4 je vidět, že nejdelší doba dozvuku byla naměřena a vypočtena při konfiguraci s vyjetým stolem (1,2882 s) a poté při konfiguraci bez pohltivých prvků (1,0393 s). Nejmenší dozvuk je pak při vysunutých akustických šálách, které patrně zvukové vlny pohlcují, takže dozvuk dosahuje pouze 0,7808 s. Zákonitě by tomu mělo být podobně i u kritéria EDT , což je počáteční doba dozvuku, takže délka tohoto dozvuku je menší než T_{60} , ale poměry mezi konfiguracemi by měly být stejné, což se potvrdilo. Opět nejdelší dobu EDT vidíme u konfigurace s vyjetým stolem (0,9675 s) a nejnižší při vysunutých šálách (0,7017 s).

Dle normy [4] by měl prostor sloužící pro operu nebo hudební divadlo mít dobu dozvuku asi 1,25 s (za daného objemu 1638 m³). Pro činoherní divadlo, zkušebnu činohry nebo posluchárnu by doba dozvuku měla být asi 0,9 s (opět za daného objemu). Jak je vidět z výsledků výpočtů doby dozvuku (Tab. 4), tak sál divadla Na Orlí lze pomocí různých konfigurací přizpůsobit pro obě využití, protože např. u konfigurace s vyjetým stolem jsme se blížili k době dozvuku vhodné pro operní představení a u konfigurace při normálním rozestavení zase spíše pro činoherní využití sálu.

C7, C50 a C80

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.7, kritérium míra přímého zvuku C_7 vypovídá o možnostech lokalizace přímého zvuku. Hodnoty vyšší než -15 dB připouští dobrou lokalizaci a čím více se hodnoty blíží 0 dB, tím lepší lokalizace je. Z výpočtů vyplývá, že nejlepší lokalizace při opeře Impresário je v konfiguraci s vysunutými šálami (-13,7177 dB) a naopak nejhorší v konfiguraci s vyjetým stolem (-14,3107 dB). Je zde vidět jasná spojitost s dobou dozvuku, dle které lze soudit, že kratší doba dozvuku znamená lepší možnosti lokalizace a delší doba dozvuku naopak horší možnosti lokalizace zvuku.

Dle práce Anteka a Vonráška [8] kritérium C_{50} vypovídá o srozumitelnosti mluveného slova v daném prostoru. Výsledné hodnoty nad 0 dB ukazují na dobrou srozumitelnost a hodnoty pod - 5 dB pak vypovídají o nevhodnosti daného prostoru pro přednes mluveného slova. Výpočtem z impulsových charakteristik naměřených pro operu Impresário jsme došli k hodnotám pohybujícím se nad onou hranicí 0 dB ve všech případech. Nejvyšší hodnoty C_{50} byly naměřeny a vypočteny při konfiguraci s vysunutými akustickými šálami. V této konfiguraci je tedy nejlepší prostředí pro přednes mluveného slova (6,9194 dB). Naopak nejhorší prostředí pro přednes mluveného slova vzniká při konfiguraci bez pohltivých prvků, kdy je kritérium C_{50} nejnižší (4,8609 dB).

Jak již bylo zmíněno na počátku této kapitoly, u kritéria C_{80} , které podle Anteka a Vondráška [8] vypovídá o jasnosti rozlišení tónů v rychlých pasážích, bohužel nastal problém při vyhodnocení dat. Jelikož se hodnoty C_{80} nachází v oblasti, kde byl zvukový pokles přehlušen hlukem měřicího řetězce a pozadí, nelze pro dané naměřené hodnoty kritérium C_{80} spolehlivě určit. Do tabulky výsledků výpočtů (Tab. 4) jej tedy ani neuvádím.

D50, t_s a H

Naměřené a vypočtené hodnoty pro kritérium zřetelnost (D_{50}) se pohybují od 0,5894 (konfigurace vyjetý stůl) do 0,6612 (vysunuté šály), což je rozmezí, které odpovídá typickým hodnotám z normy [5], které by se měly pohybovat mezi 0,3 až 0,7.

Kritérium těžiště impulsové odezvy (t_s) podle Anteka [8] vypovídá o prostorovém dojmu a jasnosti pro hudbu a mluvené slovo. Zkoumali jsme výsledky pro hudbu (oktávové pásmo 1000 Hz), kde by se měly pohybovat v rozsahu 70 až 150 ms [8]. Nejnížší hodnoty těžiště impulsové odezvy byly zaznamenány pro konfiguraci v normálním rozestavení (93,8 ms) a nejvyšší hodnoty pro konfiguraci s vyjetým stolem (136,4 ms). Konfigurace s vysunutými šálami dosahovala hodnoty 94,7 ms a bez pohltivých prvků 124,2 ms. Všechny tyto hodnoty se pohybují v očekávaném rozsahu.

U míry doznívání (H) byly vypočteny hodnoty -3,6706 dB pro konfiguraci vyjetý stůl, -4,8609 dB pro konfiguraci bez pohltivých prvků, -5,7865 dB pro konfiguraci v normální rozestavení a -6,9191 dB pro konfiguraci s vysunutými šálami. Největší hodnota tedy byla zaznamenána pro konfiguraci s vyjetým stolem a nejnižší pro vysunuté šály, což opět koresponduje s dobou dozvuku. Dle Balloua [11] by se měly hodnoty kritéria H pohybovat v rozmezí 0 až 4 dB pro koncertní sály, -2 dB až 4 dB pro hudební divadla s možností použití pro koncerty. Pokud je hodnota kritéria mezi -5 dB a 2 dB, znamená to, že dojem prostorovosti je průměrný. Výsledkem měření a výpočtů tedy je, že sál divadla Na Orlí nenabízí svým návštěvníkům významný dojem prostorovosti, je pouze průměrný.

5.1.2 operní představení Mirandolina

Měření impulsových charakteristik proběhlo také pro operu Mirandolina a tři konfigurace sálu: normální rozestavení, šály, bez pohltivých prvků. Veškeré vypočítané hodnoty jsou k dispozici v Tab. 5 níže.

Tab. 5.2: Výsledné hodnoty monaurálních kritérií pro tři konfigurace sálu při scénickém řešení pro operu *Mirandolina*

Monaurální kritéria: operní představení <i>Mirandolina</i>						
	normální rozestavení			šály		
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
T60	0,8865 s	0,0697 s	vyhovuje	0,8743 s	0,0263 s	vyhovuje
EDT	0,7829 s	0,0522 s	vyhovuje	0,8365 s	0,0235 s	vyhovuje
C7	-16,6544 dB	11,7350 dB	nevyhovuje	-15,2275 dB	15,2282 dB	nevyhovuje
C50	5,1800 dB	2,2775 dB	vyhovuje	5,4710 dB	3,5297 dB	vyhovuje
D50	0,6213	0,0374	vyhovuje	0,6271	0,0020	vyhovuje
ts	0,0547 s	0,0036 s	nevyhovuje	0,0488 s	0,0000 s	nevyhovuje
H	-5,1800 dB	1,8713 dB	průměrný dojem prostorovosti	-5,4710 dB	3,5297 dB	průměrný dojem prostorovosti
	bez pohltivých prvků					
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje			
T60	1,1043 s	0,0421 s	vyhovuje			
EDT	0,9657 s	0,0255 s	vyhovuje			
C7	-16,9955 dB	11,6158 dB	nevyhovuje			
C50	3,1386 dB	2,9690 dB	vyhovuje			
D50	0,5739	0,0017	vyhovuje			
ts	0,0562 s	0,0000 s	nevyhovuje			
H	-3,1386 dB	2,9690 dB	průměrný dojem prostorovosti			

T60 a EDT

Co se týče doby dozvuku *T60* pro operu *Mirandolina*, nejvyšší hodnotou je 1,1043 s u konfigurace bez pohltivých prvků, nejnižší je 0,8743 s u konfigurace šály a mezi nimi je s hodnotou 0,8865 s konfigurace normální rozestavení. Pokud porovnáme výsledky opery *Mirandolina* s výsledky pro operu *Impresário*, zjistíme, že u obou oper mají poměrně dlouhou dobu dozvuku konfigurace bez pohltivých prvků, což se dá očekávat.

Hodnoty kritéria *EDT* jsou pro měření při scénickém rozestavení pro operu *Mirandolina* nejvyšší u konfigurace bez pohltivých prvků, takže stejně jako u *T₆₀*. Naopak nejnižší hodnotu *EDT* vidíme u konfigurace při normálním rozestavení (0,7829 s).

C7, C50 a C80

Jak již bylo zmíněno při hodnocení výsledků měření k opeře *Impresário*, kritérium *C₇* by pro dobrou lokalizaci zvuku mělo nabývat hodnot vyšších, než je -15 dB. Ačkoliv toto bylo splněno pro operu *Impresário*, z výsledků měření a výpočtů pro operu *Mirandolina* vyplývá, že ani pro jedno kritérium k opeře *Mirandolina* hranice -15 dB nebyla překonána. To znamená, že lokalizace zvuku při všech třech konfiguracích u opery *Mirandolina* není dobrá. Nejlepší hodnotou je -15,2275 pro konfiguraci s vysunutými šálami a nejhorší hodnotou je -16,9955 u konfigurace bez pohltivých prvků, kdy je tedy lokalizace zvuku nejhorší.

Kritérium C_{50} , jehož hodnota nad úrovní 0 dB ukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova [8], nabývá hodnot 3,1386 dB u konfigurace bez pohltivých prvků, 5,1800 dB u konfigurace normální rozestavení a 5,4710 dB u konfigurace s vysunutými šálami. Nejlepší srozumitelnost je tedy při normálním rozestavení, naopak nejhorší srozumitelnost je u konfigurace bez pohltivých prvků. Pro obě opery vyšla jako nejhorší konfigurace bez pohltivých prvků. Co se týče nejlepší konfigurace, tak tam se výsledky rozcházejí. Pro operu Impresário je to konfigurace s vysunutými šálami a pro Mirandolinu konfigurace normální rozestavení.

Hodnoty C_{80} neuvádím z důvodů, které byly zmíněny již u výpočtů pro operu Impresário (Kap. 5.1.1.).

D50, t_s a H

Zřetelnost (D_{50}) nabývá hodnot od 0,5739 do 0,6213. Stejně jako u opery Impresário, i zde je hodnota D_{50} nejnižší pro konfiguraci bez pohltivých prvků. Pořadí dalších dvou hodnot se však oproti opeře Impresário liší. Nejnižší hodnoty (0,6213) jsme se dočkali u konfigurace normální rozestavení a velmi podobnou hodnotu lze vidět u konfigurace s vysunutými šálami (0,6271). Všechny tři hodnoty se pohybují v očekávaném rozmezí dle normy [6] 0,3 s až 0,7 s.

Čas těžiště impulsové odezvy (t_s) byl vypočten nejnižší pro konfiguraci s vysunutými šálami (48,8 ms), dále pak 54,7 ms pro normální rozestavení a 56,2 ms pro konfiguraci bez pohltivých prvků. Protože podle Anteka a Vondráška [8] je pro hudbu ideální hodnota t_s mezi 70 ms a 150 ms, je nutno zmínit, že (na rozdíl od scénického řešení opery Impresário) ani jedna z konfigurací nevyhovuje požadavkům na ideální prostorový dojem a jasnost.

Posledním zkoumaným kritériem pro scénické řešení opery Mirandolina je kritérium míra doznívání (H), jehož hodnoty by se měly pohybovat od -2 dB po 4 dB [6]. Ani nejlepší hodnota, která byla vypočtena pro kritérium bez pohltivých prvků (-3,1386 dB) však tomuto požadavku nevyhovuje. Dozvukový prostorový dojem hudebního výkonu při scénickém řešení operního představení Mirandolina je tedy nutno označit jako průměrný. U konfigurace s vysunutými šálami jsme se dostali na -5,4710 dB a pro normální rozestavení -5,1800 dB.

5.2 Zhodnocení výsledků kritéria Lateral Fraction

Objektivní kritérium *Lateral Energy Fraction (LF)* je jedním z binaurálních kritérií, protože k snímání impulsových charakteristik pro výpočet tohoto kritéria se používá vždy dvojice mikrofónů (jeden s osmičkovou charakteristikou a druhý s všesměrovou charakteristikou). Bohužel při měření vzorků, z kterých vycházím při výpočtech, nedošlo k sejmutí kalibračního náměru a tudíž se nedá zpětně dohledat, jakou měly dané mikrofony nastavenou citlivost. Absolutní hodnoty kritéria LF tedy z naměřených vzorků nelze zjistit, můžeme porovnávat pouze velikosti mezi sebou.

5.2.1 operní představení Impresário

Při scénickém řešení pro operu Impresário byly naměřeny impulsové charakteristiky pro čtyři konfigurace sálu, z nichž jsem vypočítal dané hodnoty kritéria LF a jejich rozptyly viz Tab. 5.3.

Tab 5.3: Vypočítané hodnoty kritéria LF pro čtyři konfigurace sálu pro scénické řešení operního představení Impresário

Lateral Fraction: operní představení Impresário		
konfigurace sálu	průměr	rozptyl
normální rozestavení	0,3131	0,0090
šály	0,3110	0,0106

bez pohltivých prvků	0,3405	0,0173
vyjetý stůl	0,3445	0,0197

Největší hodnoty LF můžeme vidět u konfigurace vyjetý stůl a také bez pohltivých prvků, nejnižší hodnoty pak u konfigurace s vyjetými šálami a při normálním rozestavení sálu. K optimálním hodnotám 0,1 až 0,25 se bohužel nedostáváme, z důvodu chybějících údajů o citlivosti mikrofonů, jak bylo vysvětleno výše.

5.2.2 operní představení Mirandolina

Při scénickém řešení pro operu Mirandolina byly naměřeny impulsové charakteristiky pro tři konfigurace sálu, z nichž jsem vypočítal dané hodnoty kritéria LF a jejich rozptyly viz Tab. 7.

Tab. 5.4: Vypočítané hodnoty kritéria LF pro tři konfigurace sálu pro scénické řešení operního představení Mirandolina

Lateral Fraction: operní představení Mirandolina		
konfigurace sálu	průměr	rozptyl
normální rozestavení	1,5334	1,1566
šály	1,4169	0,8158
bez pohltivých prvků	1,5577	0,6928

Ani u hodnot kritéria LF pro rozestavení při opeře Mirandolina se nedostáváme k optimálním hodnotám (0,1 až 0,25) z důvodu chybějících údajů o citlivosti mikrofonů. Nejvyšší hodnotu vidíme pro konfiguraci bez pohltivých prvků a nejnižší pro vyjeté akustické šály.

5.3 Zhodnocení výsledků kritérií BR a HFR

Objektivní kritéria BR (podpora hlubokých tónů) a HFR (podpora vysokých tónů) byla vypočtena z impulsových odezev naměřených při dvou scénických řešeních sálu pro opery Impresário a Mirandolina. Pro operu Impresário byly naměřeny a vypočteny hodnoty BR a HFR pro čtyři různé konfigurace akustických prvků v sále, pro operu Mirandolina to byly pouze tři konfigurace akustických prvků v sále. Ideální hodnoty BR i HFR mají být blízké 1, ale nikdy by neměly pod tuto hodnotu klesnout.

5.3.1 operní představení Impresário

Při scénickém řešení pro operu Impresário byly brány v úvahu čtyři konfigurace sálu: normální stav, šály, bez pohltivých prvků, vyjetý stůl. Jak je možné vidět v tabulce níže (Tab. 8), hodnoty kritéria HFR (podpora vysokých tónů) se pohybovaly od 1,1378 při normálním stavu až po nejvyšší hodnotu 1,855 při vysunutých akustických šálách. Při všech čtyřech konfiguracích lze říci, že hodnoty HFR byly vyhovující, protože nikdy neklesly pod hodnotu 1.

Tab 5.5: Výsledné hodnoty kritérií BR a HFR pro operní představení Impresário

BR/HFR: operní představení Impresário			
normální stav			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	0,9703	0,0101	nevyhovuje

HFR	1,1378	0,0024	vyhovuje
šály			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	1,0309	0,0108	vyhovuje
HFR	1,1855	0,003	vyhovuje
bez pohltivých prvků			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	0,994	0,012	nevyhovuje
HFR	1,1473	0,0024	vyhovuje
vyjetý stůl			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	1,1128	0,0225	vyhovuje
HFR	1,1702	0,0036	vyhovuje

U kritéria *BR* tato podmínka splněna nebyla. Nejnižší hodnota 0,9703 při normálním stavu a také 0,9940 bez pohltivých prvků je již pod hranicí 1 a při těchto konfiguracích lze říci, že podpora hlubokých tónů není ideální. Nejvyšší hodnota *BR* je 1,1128 při vyjetém stole.

5.3.2 operní představení Mirandolina

Při scénickém řešení k opeře Mirandolina byly naměřeny hodnoty pro tři konfigurace sálu: normální stav, šály, bez pohltivých prvků.

Tab. 5.6: Výsledné hodnoty kritérií *BR* a *HFR* pro operní představení Mirandolina

BR/HFR: operní představení Mirandolina			
normální stav			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	0,9556	0,0062	nevyhovuje
HFR	1,0385	0,0030	vyhovuje
šály			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	0,9345	0,0063	nevyhovuje
HFR	0,9724	0,0029	nevyhovuje
bez pohltivých prvků			
	průměr	rozptyl	vyhovuje/nevyhovuje
BR	0,9374	0,0091	nevyhovuje
HFR	1,0284	0,0021	vyhovuje

Jak je možné vidět v Tab. 9 výše, v porovnání s hodnotami *BR* a *HFR* při scénickém řešení operního představení Impresário jsou hodnoty při scénickém řešení operního představení Mirandolina nižší. Především to platí pro konfiguraci s vytaženými akustickými šálami, kdy se obě hodnoty dostávají pod hranici jedné (0,9345 a 0,9724) a tím pádem se stávají nevyhovujícími.

Kritérium *BR* nabývá velmi pohodných hodnot také pro konfiguraci bez pohltivých prvků i za normálního stavu. Kritérium *HFR* je na tom u dalších dvou konfigurací lépe, protože se dostává nad

hranici jedné (1,0385 a 1,0284) a tím pádem splňuje požadavek. To se o kritériu *BR* říct, nedá, protože je nevyhovující pro všechny tři konfigurace u opery *Mirandolina*.

5.4 Zhodnocení výsledků kritéria IACC

Již bylo řečeno, že činitel interaurální vzájemné korelace *IACC* (*Interaural Cross Correlation Coefficient*) by měl vypovídat o tom, jaký máme v koncertním sále subjektivní dojem prostorovosti. Počítal jsem kritérium *IACC* pro třetinooktávová pásma 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz, s časovými integračními mezemi $t_1=0$ ms a $t_2=80$ ms, konkrétně se tedy jedná o hodnotu $IACC_{E3}$. S těmito frekvenčními pásmy a danými časovými integračními mezemi nejlépe hodnocené sály dosahují hodnoty okolo 0,6 [$1-IACC_{E3}$].

K dispozici jsem měl naměřené binaurální impulsové charakteristiky pouze pro tři konfigurace při scénickém rozestavení pro operu *Mirandolina*.

5.4.1 operní představení *Mirandolina*

Z impulsových charakteristik naměřených při rozestavení sálu pro operu *Mirandolina* jsem vypočítal hodnoty kritéria *IACC* a jejich rozptyly vždy pro tři třetinooktávová pásma a tři konfigurace sálu viz Tab. 10.

Tab. 5.7: Výsledné hodnoty kritéria *IACC* a jejich rozptyly

IACC			
Data: 151106_DnO_HATS			
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
normální rozestavení			
průměr	0,5557	0,5881	0,5583
rozptyl	0,0205	0,0202	0,0691
šály			
průměr	0,5728	0,5411	0,6250
rozptyl	0,0178	0,0189	0,0734
bez pohltivých prvků			
průměr	0,6828	0,6992	0,6067
rozptyl	0,0226	0,0385	0,0505

V třetinooktávových pásmech 500 Hz i 1000 Hz byla hodnota *IACC* nejvyšší pro konfiguraci bez pohltivých prvků. Pro třetinooktávové pásmo 2000 Hz jsem zaznamenal nejvyšší hodnotu *IACC* u konfigurace s vysunutými šálami. Nejnížší hodnoty jsme pak dosáhli v třetinooktávovém pásmu 1000 Hz pro konfiguraci s vysunutými šálami. Je tedy vidět, že hodnoty se mění nejen v závislosti na zvolené konfiguraci, ale jsou rozdílné také pro daná oktávová pásma.

Jako výborné hodnoty $IACC_{E3}$ jsou obecně hodnoty okolo 0,6. Excelentní sály mají i okolo 0,3. Cílem je tedy hodnota $IACC_{E3}$ co nejnižší. Na základě toho můžeme říci, že nejlepšího subjektivního dojmu prostorovosti je dosaženo při vysunutých šálách a třetinooktávovém pásmu 1000 Hz. Naopak nejhoršího výsledku bylo dosaženo při konfiguraci bez pohltivých prvků a třetinooktávovém pásmu 1000 Hz.

5.5 Zhodnocení výsledků kritéria G

Ačkoliv v teoretické části práce (Kap. 2.7) je uvedeno a definováno kritérium *míra hlasitosti* (*G*), v praktické části jeho výsledky až doposud zmiňovány nebyly. Důvodem toho je, že zvukové vzorky pro výpočet tohoto kritéria mají být snímány ve vzdálenosti 10 m od všesměrového zdroje zvuku, což v sále

Divadla na Orlí sice lze, ale další podmínkou je, že daná impulzová odezva má být snímána ve volném poli, což už pro sál o rozměrech Divadla na Orlí představuje problém. Ačkoliv jsou k dispozici vzorky naměřené ve vzdálenosti 10 m od zdroje zvuku, kvůli nízké vzdálenosti od okolních stěn nelze říci, že se jednalo o volné pole ale o pole difuzní.

K dispozici je však zjednodušená rovnice (20), dle které lze vypočítat alespoň orientační hodnoty kritéria *míry hlasitosti*.

Tab. 5.8: výsledné hodnoty pro kritérium *míra hlasitosti (G)*

název opery	konfigurace sálu	T60 (s)	V (m ³)	G (dB)
operní představení Impresário	normální rozestavení	0,8386	1638	12,0922
	šály	0,7808	1638	11,7821
	bez pohltivých prvků	0,9148	1638	12,4700
	vyjetý stůl	1,1113	1638	13,3152
operní představení Mirandolina	normální rozestavení	0,8865	1638	12,3337
	šály	0,8743	1638	12,2736
	bez pohltivých prvků	1,1043	1638	13,2878

Jak lze vidět z Tab. 11 výše, hodnoty kritéria *G* se pohybují v rozmezí 11,78 dB až 13,32 dB. Nejnižší hodnota vychází pro operu Impresário a konfiguraci s vysunutými šálami, nejvyšší hodnota pak vychází také pro operní představení Impresário a konfiguraci s vyjetým stolem.

Žádná z těchto hodnot však neodpovídá optimálnímu rozmezí 4 až 5,5 dB dle [8].

5.6 Porovnání frekvenčních charakteristik a impulsových odezev

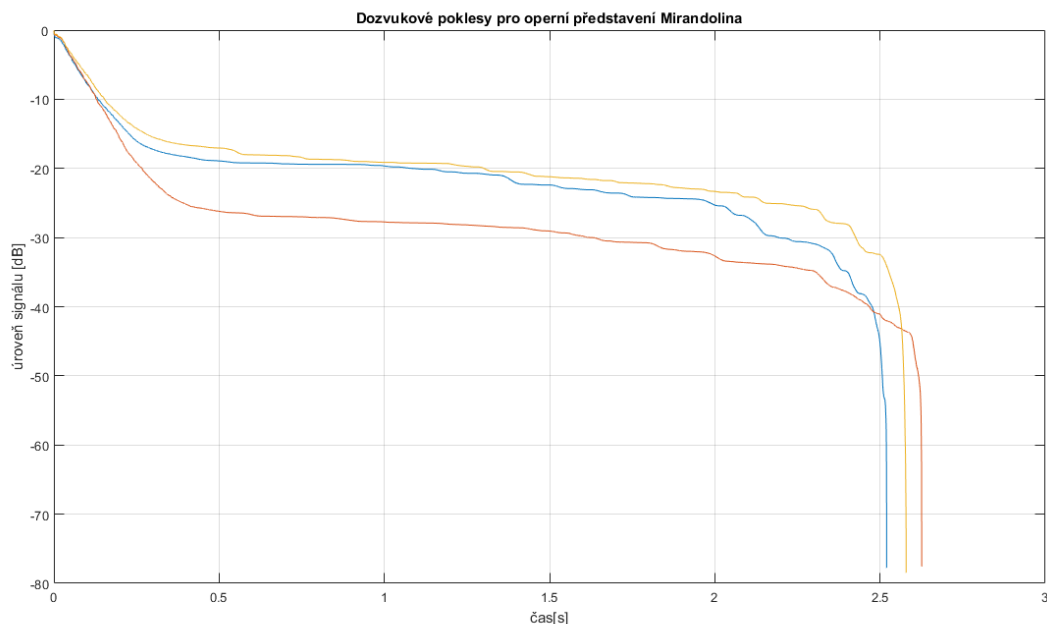
Z frekvenčních charakteristik (viz. příloha) je vidět, že modul klesá především na nízkých a velmi vysokých kmitočtech (cca do 50 Hz a nad 10 000 Hz). U charakteristik pro konfigurace šály a vyjetý stůl vidíme, že pro střední kmitočty jsou poměrně rovné. To neplatí u konfigurací normální rozestavení a bez pohltivých prvků, kde je vidět, že na středních kmitočtech (cca 100 Hz až 1000 Hz) modul roste. Fáze je u všech charakteristik velmi podobná.

Co se týče impulsových odezev, tak srovnávám dvě impulsové odezvy, které byly vypočteny ze vstupů a výstupů naměřených při rozestavení sálu pro operní představení Mirandolina (konfigurace normální rozestavení). Obě odezvy vypadají na první pohled velice podobně (viz. příloha), při detailnějším přiblížení je však vidět, že např. v intervalu 0,2 s až 0,3 s má jedna odezva rozkmit 0,01 dB a druhá 0,02 dB. Rozkmit je tedy v tomto bodě dvojnásobný. Při bližším přiblížení je také vidět, že se liší i tvar impulsových odezev. Spolu s impulsovou odezvou se v grafu zobrazuje i vstupní přeladovaný harmonický signál a výstupní signál z mikrofonu.

5.7 Porovnání dozvukových poklesů

Porovnával jsem dozvukové poklesy pro každou ze tří konfigurací pro operní představení Mirandolina, které lze vidět na obrázku níže. Modrá křivka představuje pokles pro normální rozestavení sálu, žlutá křivka konfiguraci bez pohltivých prvků a červená křivka konfiguraci šály.

Z grafu lze vidět, že i když pokles pro konfiguraci s vysunutými šálami v prvních 0,5 s klesá nejstrměji, ve výsledku je nejdelší. Poklesy pro normální rozestavení a konfiguraci bez pohltivých prvků vypadají velmi podobně, až by se dalo říci, že se navzájem kopírují, pouze energie žlutého poklesu (bez pohltivých prvků) je v podstatě téměř v celé délce průběhu o pár jednotek dB vyšší.



Obr. 8: Porovnání dozvukových poklesů

6 Závěr

V teoretické části práce byly shrnuty základní vztahy, definice a pojmy z oblasti prostorové akustiky, ať už šlo o útlum zvuku při šíření prostředím, zvukovou pohltivost a koeficient zvukové pohltivosti pro různé materiály, základní předpoklady statistických modelů, doba dozvuku i pravidla pro její určení. Dále byl kladen důraz na vysvětlení impulsové charakteristiky a metod pro její měření. Velkou část teoretické části práce tvoří shrnutí objektivních kritérií kvality koncertních sálů a popis výpočtů a měření těchto kritérií.

V praktické části bylo krátce představeno programové prostředí Matlab a dále zde byl popsány funkce pro Matlab, které pomocí impulsových počítají některá objektivní kritéria kvality koncertních sálů, statisticky výsledná data zpracovávají a rozhodují o jejich vhodnosti nebo nevhodnosti. Byla detailně popsána funkce těchto skriptů a na zvukových vzorcích naměřených v sále divadla Na Orlí byly provedeny zkušební výpočty, jejichž výsledky byly zpracovány, porovnány a okomentovány. Zároveň byly popsány funkce pro výpočet impulsové odezvy a kmitočtové odezvy. Výsledky těchto funkcí jsou taktéž přiloženy a okomentovány.

Zdroje

[1] SCHIMMEL, J. Elektroakustika. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 1-167. ISBN 978-80-214-4716-5 (cs)

[2] MORSE, Philip M. Vibration and sound. New York: American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1981. ISBN 0883182874.

[3] GEIST, Bohumil. *Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. 1. Praha: MUZIKUS, 2005. ISBN 80-86253-31-7. [4] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 9788073312978.

- [5] ČSN 73 0252. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [6] ČSN 73 0527. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [7] Analýza a zpracování signálů: 4. Diskrétní systémy, výpočet impulsní odezvy, konvoluce, korelace. *Katedra informatiky a výpočetní techniky* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2017-06-03]. Dostupné z: http://www.kiv.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs4_Diskretni_systemy.pdf
- [8] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. „Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů“. *Akustické listy*, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18.
- [9] Prostory. *Divadlo na Orlí: Hudebně-dramatická laboratoř JAMU* [online]. Brno: JAMU [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://divadlonaorli.jamu.cz/index.php?p=pronajem>
- [10] Příspěvatelé Wikipedie, *MATLAB* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2016, Datum poslední revize 6. 12. 2016, 13:28 UTC, [citováno 31. 05. 2017] <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=MATLAB&oldid=14408983>>
- [11] M. BALLOU, Glen, ed. *Handbook for Sound Engineers*. 5. Burlington: Focal Press, 2015. ISBN 978-0-415-84293-8.

Seznam použitých zkratk

BR	Bass Ratio
CT	Objective Clarity
EDT	Early Decay Time
EK	Echo Criterion
HFR	High Frequency Ratio
IACC	InterAural Cross correlation
ITDG	Initial Time Delay Gap
LF	Lateral Energy Fraction
MLS	Maximum Length Sequence
RT	Reverberation Time
TDS	Time Delay Spectrometry
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform

Seznam příloh

A Grafické znázornění objektivních kritérií

- A.1 Znázornění monaurálních kritérií pro operní představení Impresário
- A.2 Znázornění monaurálních kritérií pro operní představení Mirandolina
- A.3 Znázornění kritérií LF
- A.4 Znázornění kritéria IACC
- A.4 Znázornění kritérií BR a HFR

B Grafické znázornění průběhů

- B.1 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace normální rozestavení
- B.2 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace šály
- B.3 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace bez pohltivých prvků
- B.4 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace s vyjetým stolem
- B.5 Impulsové odezvy – operní představení Mirandolina – konfigurace normální rozestavení

C Vývojové diagramy

- C.1 diagram „statistikaMonaural.m“
- C.2 diagram „statistikaBinaural.m“
- C.3 diagram „statistikaBRHFR.m“
- C.4 diagram „statistikaIACC.m“
- C.5 diagram „Monaural.m“
- C.6 diagram „IACCfinal.m“

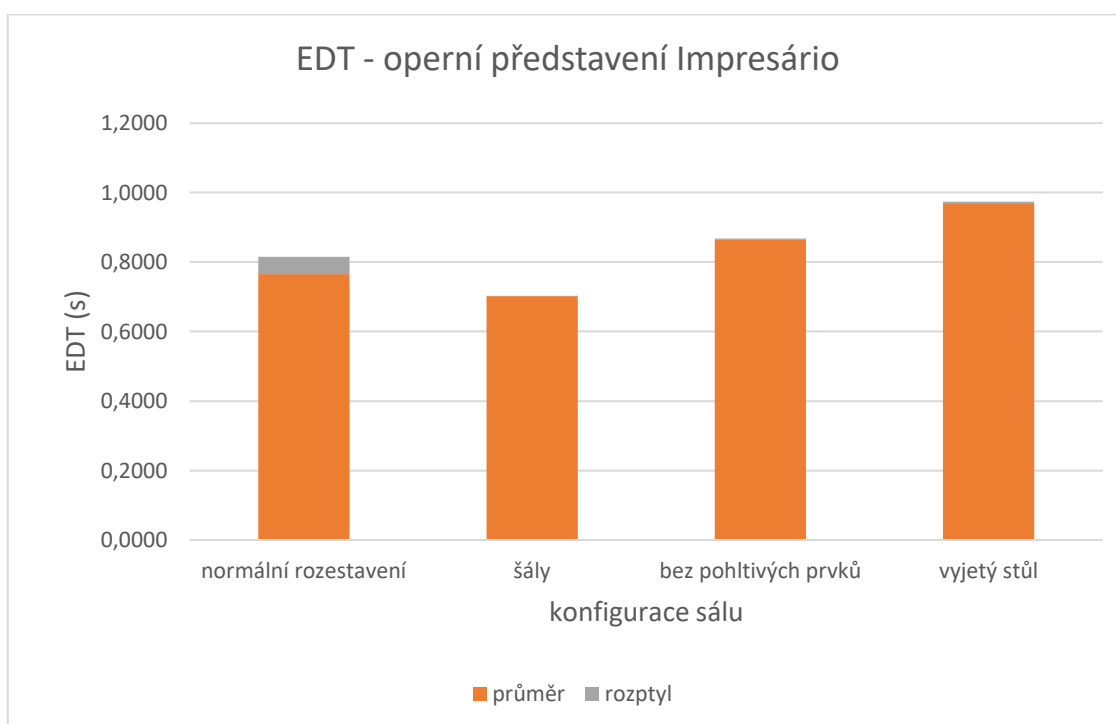
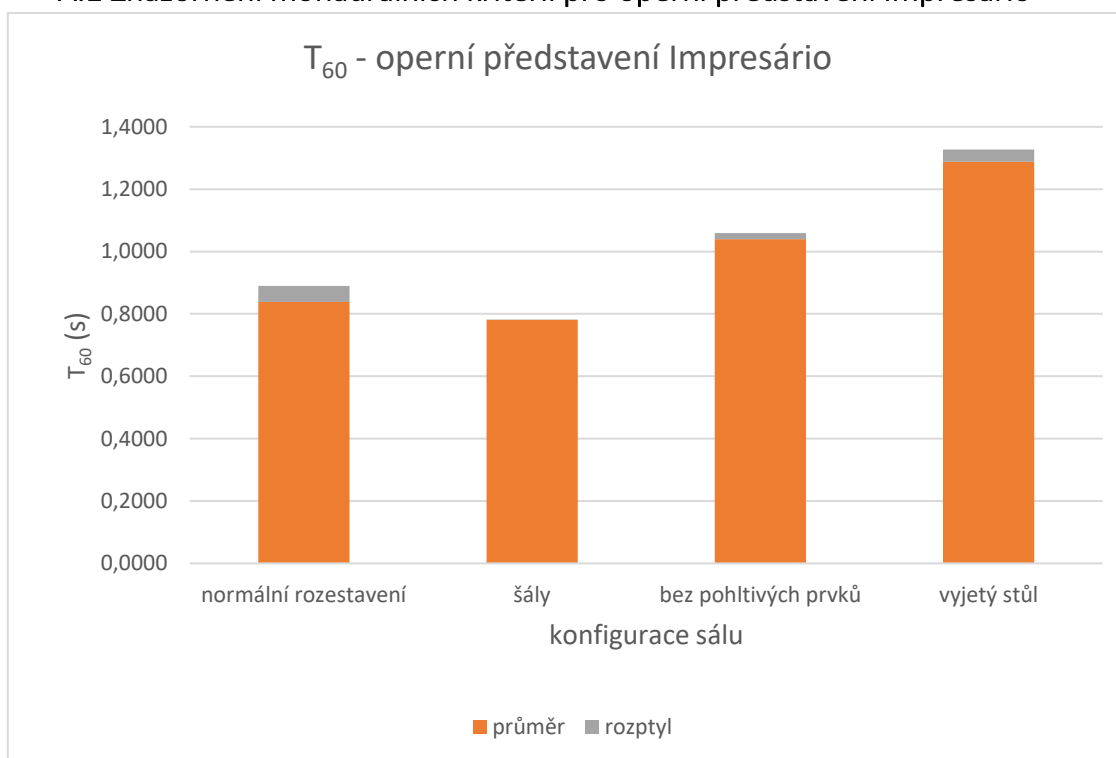
D CD disk

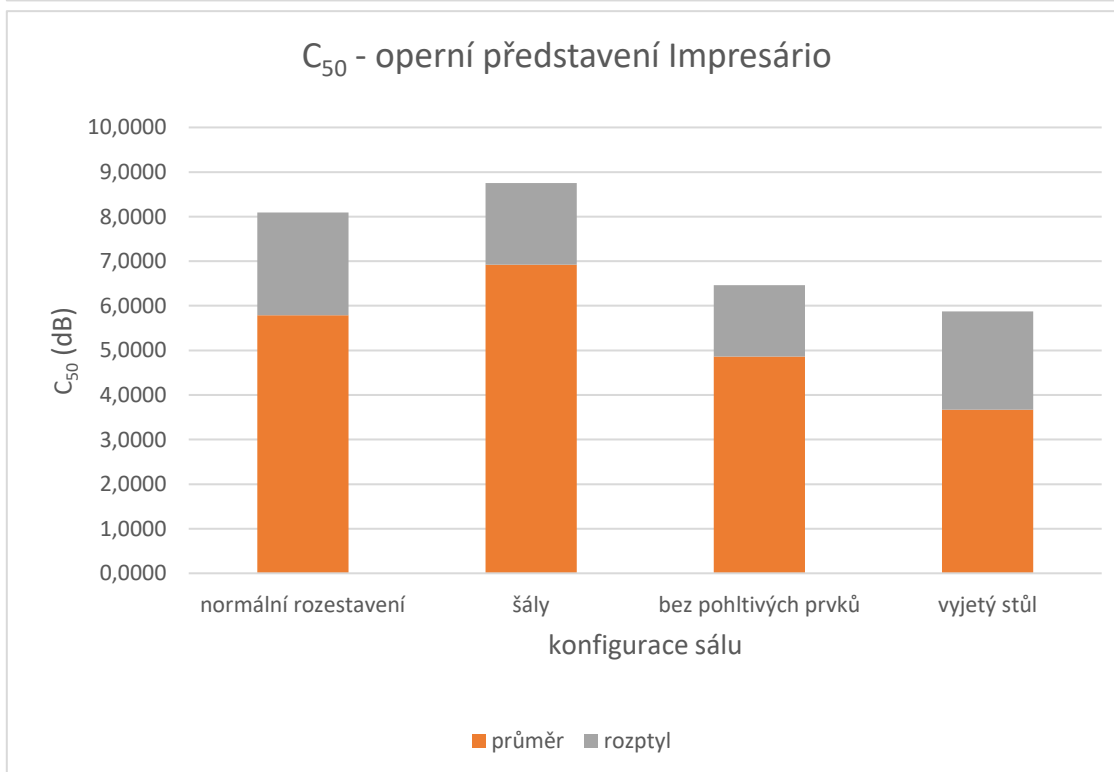
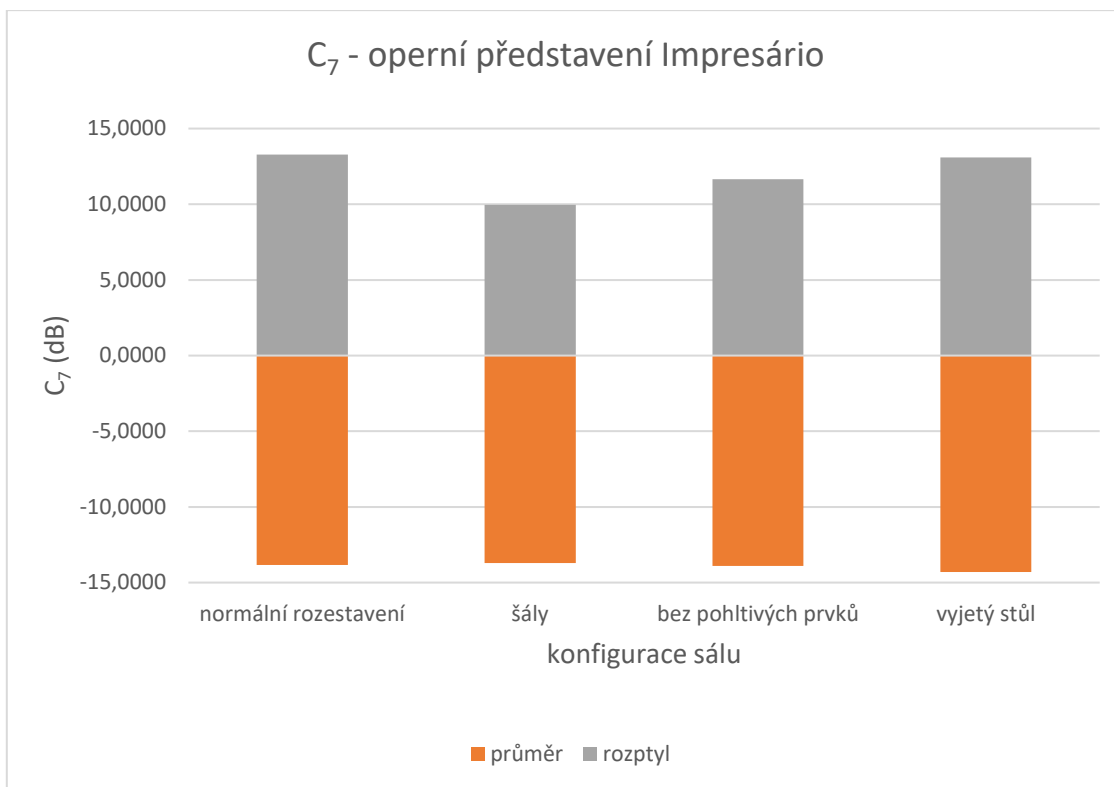
pozn.: Na CD se nachází dokument „kompletní hodnoty.xlsx“, na kterém lze najít veškeré vypočtené hodnoty a z nich vytvořené průměry, rozptyly a grafy. Dále se tam nachází také veškeré dokumenty typu m-file, s jejichž pomocí byly prováděny veškeré výpočty, vykreslení grafů a porovnání hodnot.

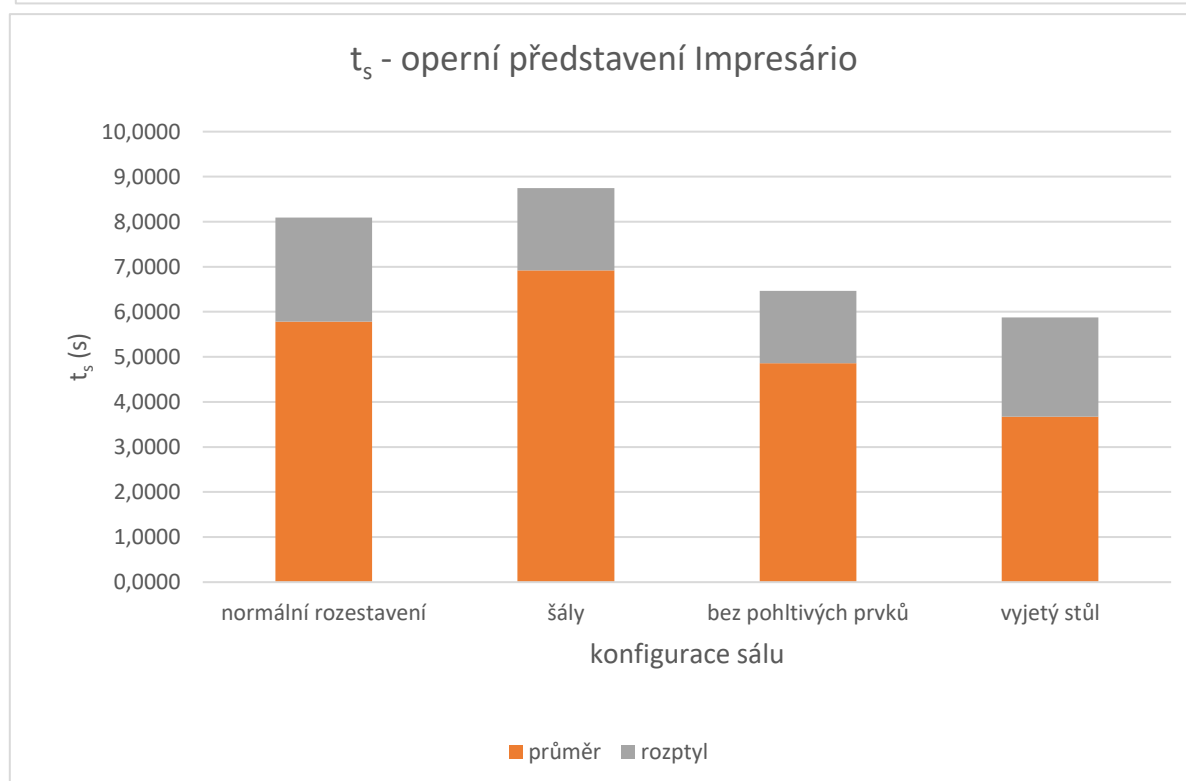
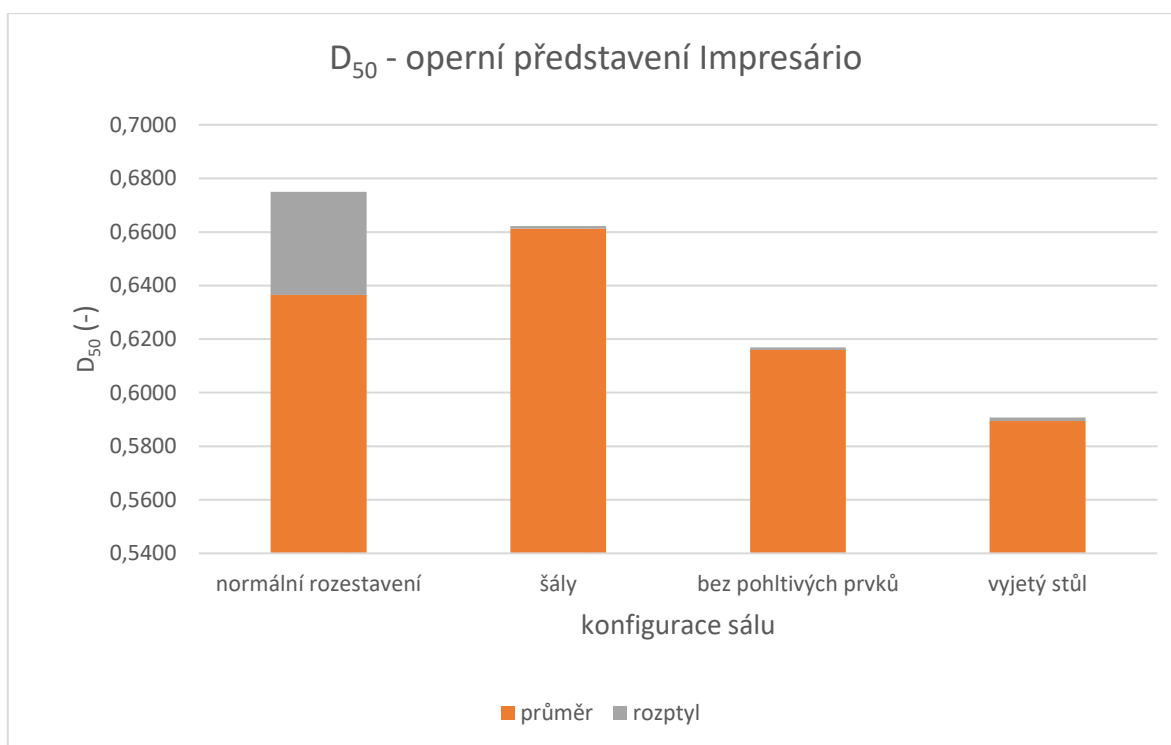
Přílohy

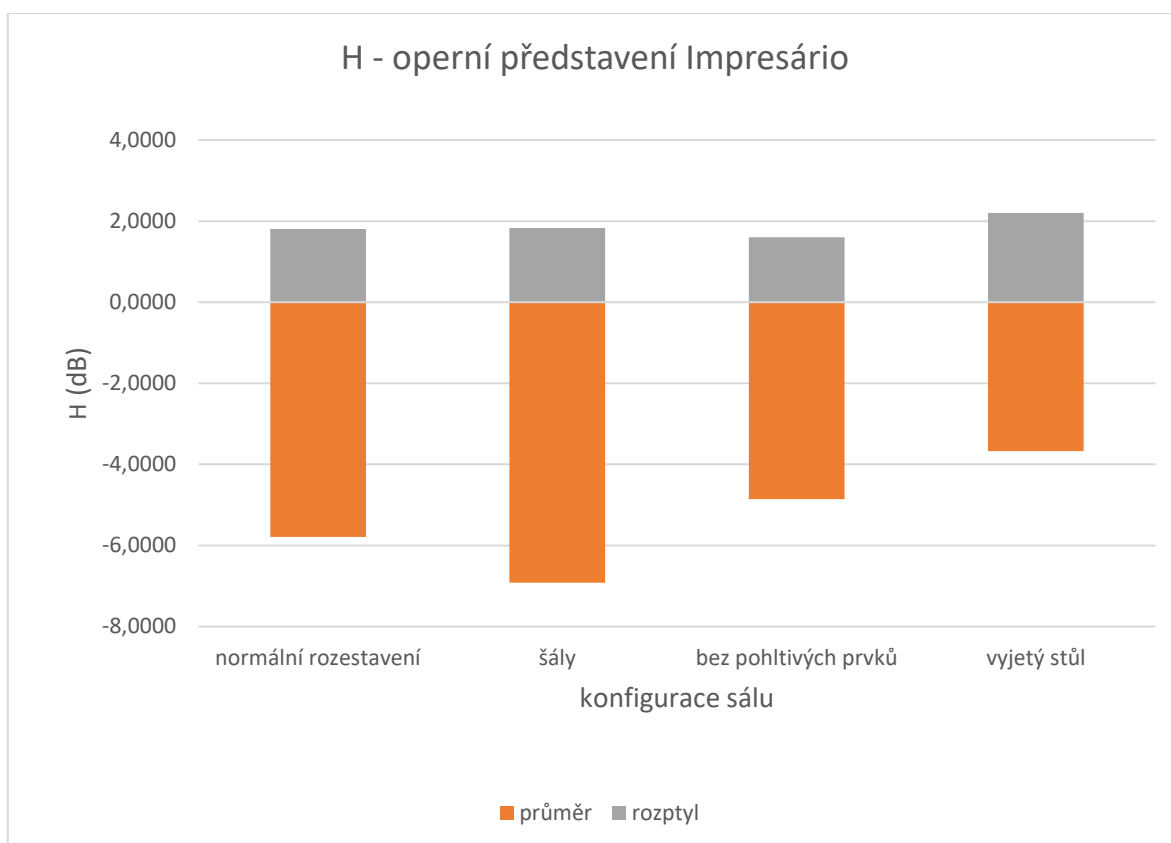
A Grafická znázornění objektivních kritérií

A.1 Znázornění monaurálních kritérií pro operní představení Impresário

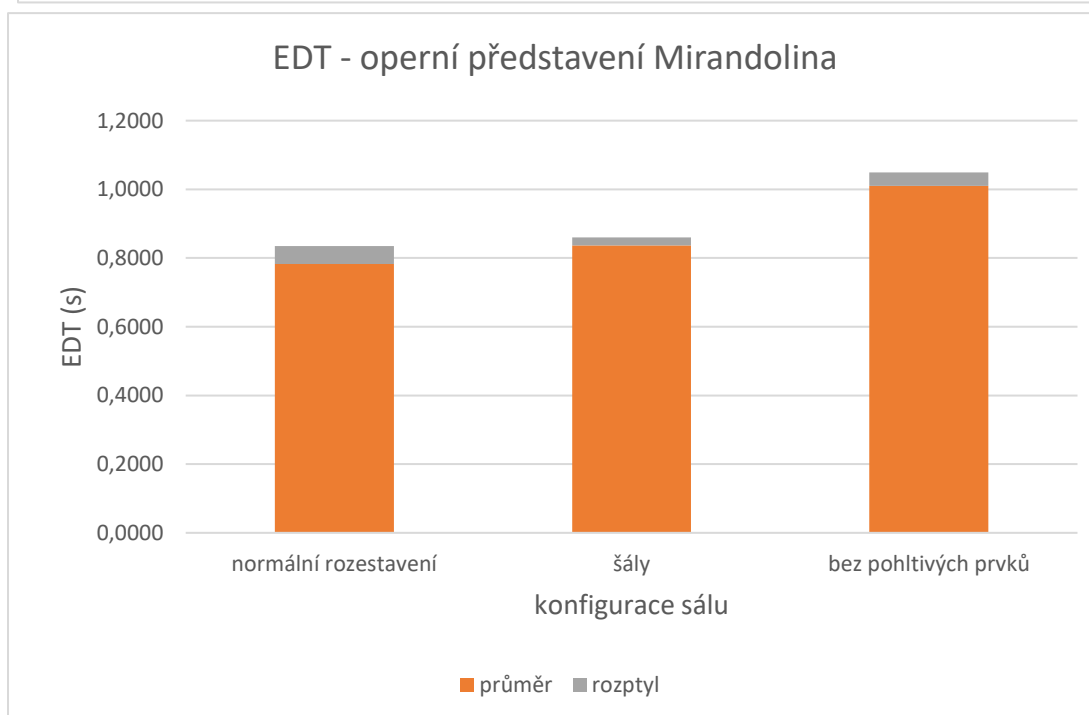
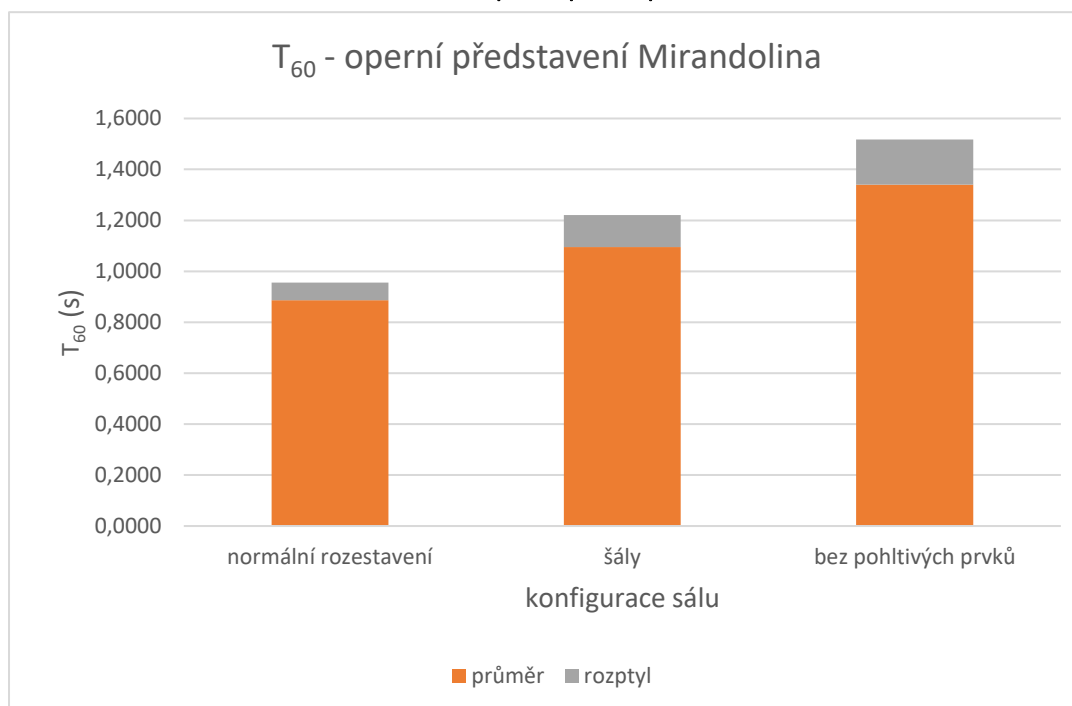


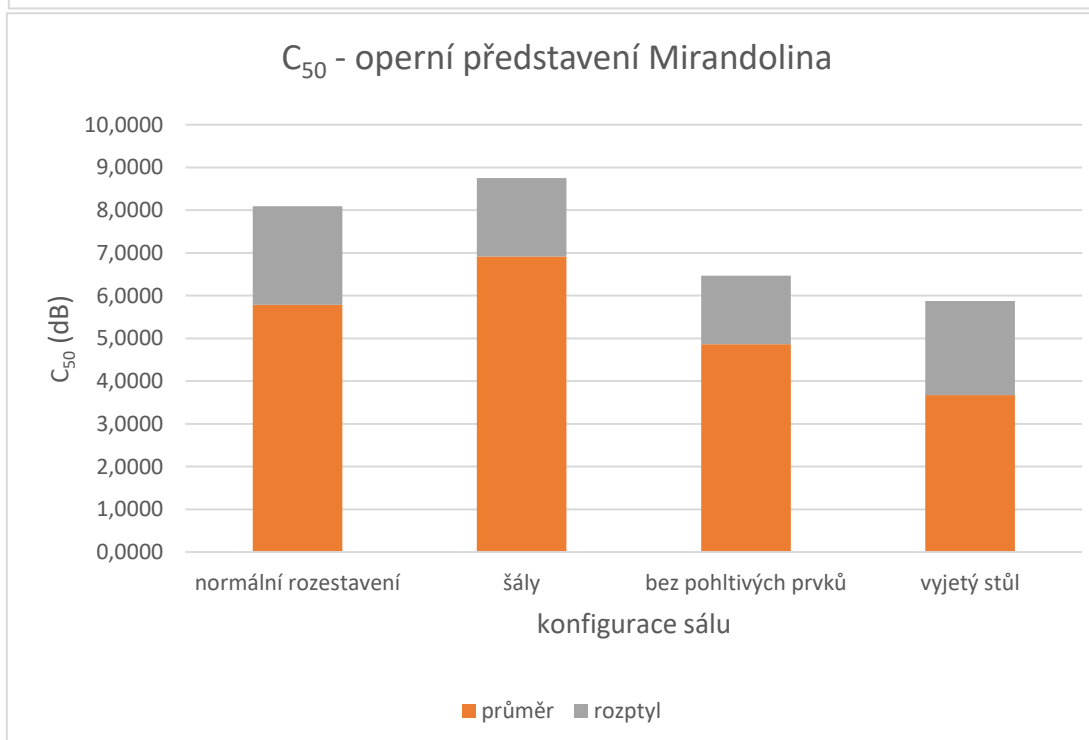
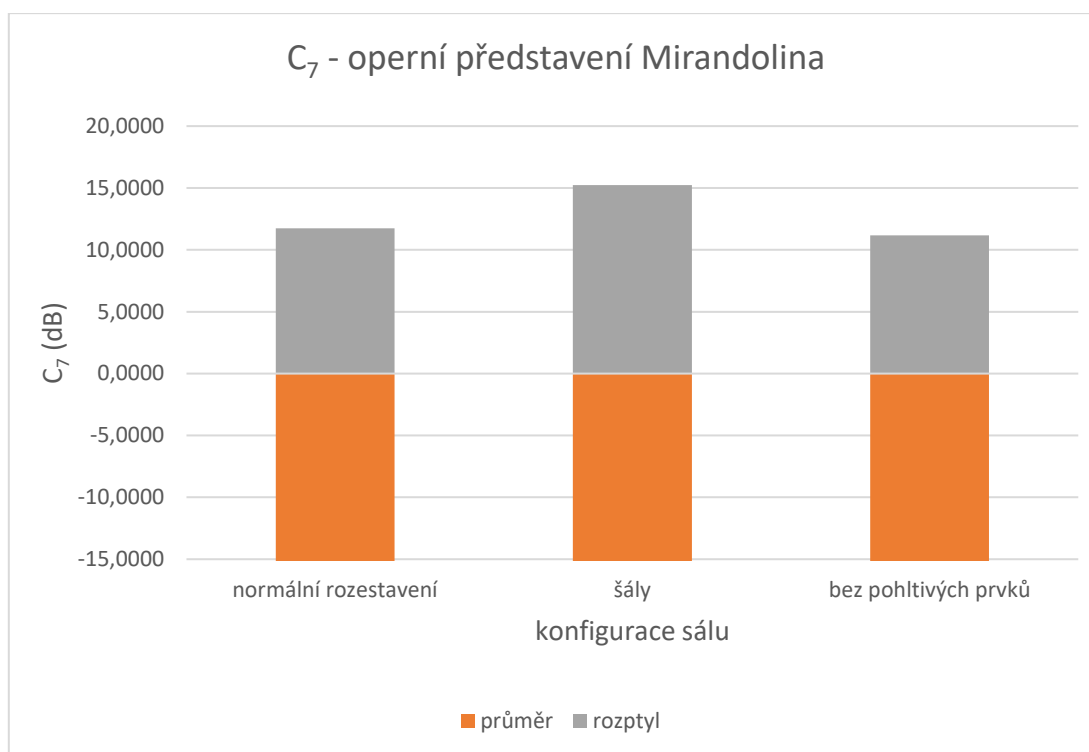


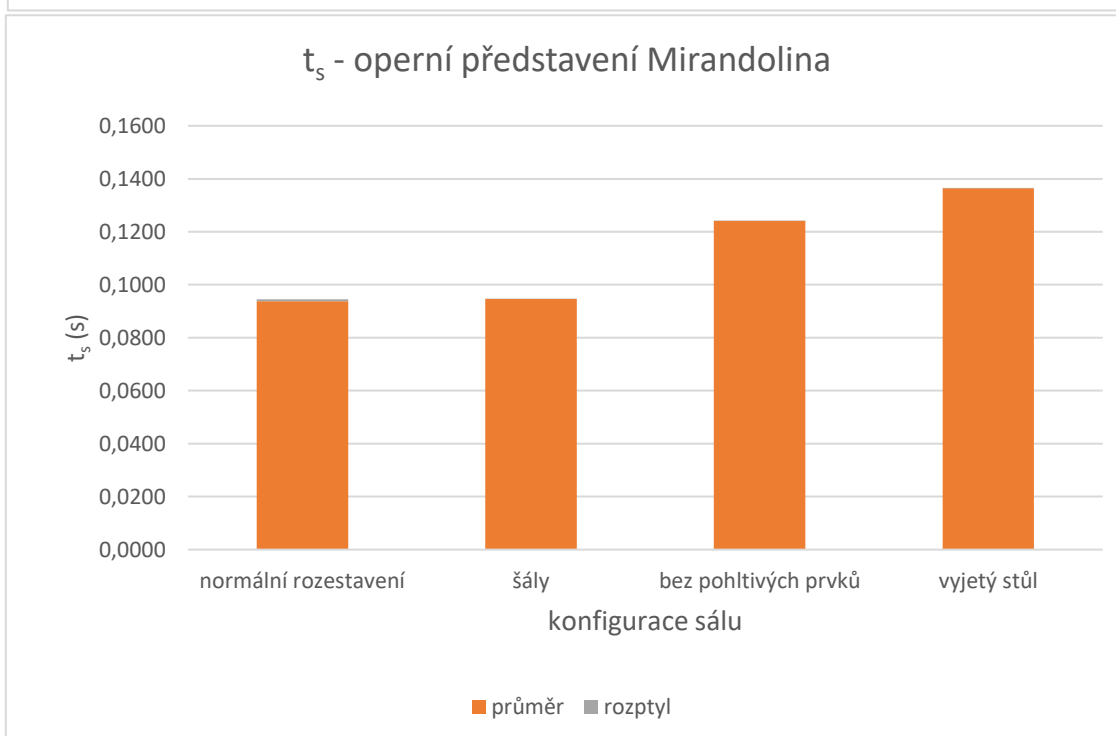
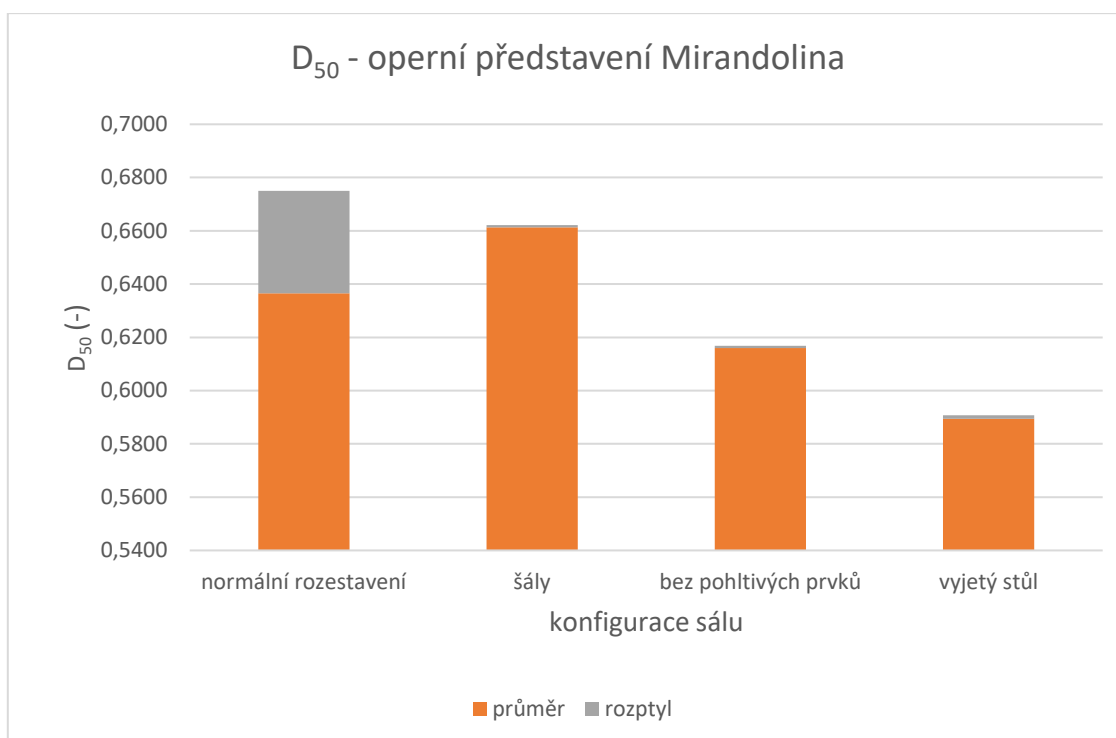


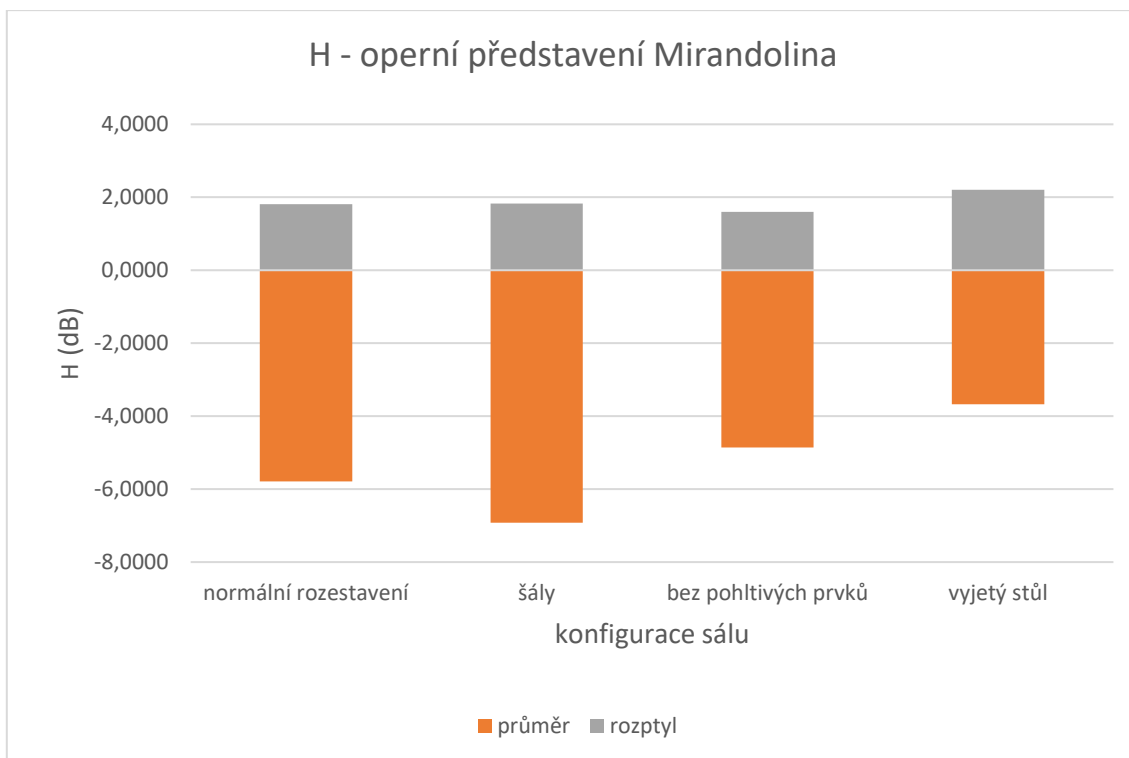


A.2 Znázornění monaurálních kritérií pro operní představení Mirandolina

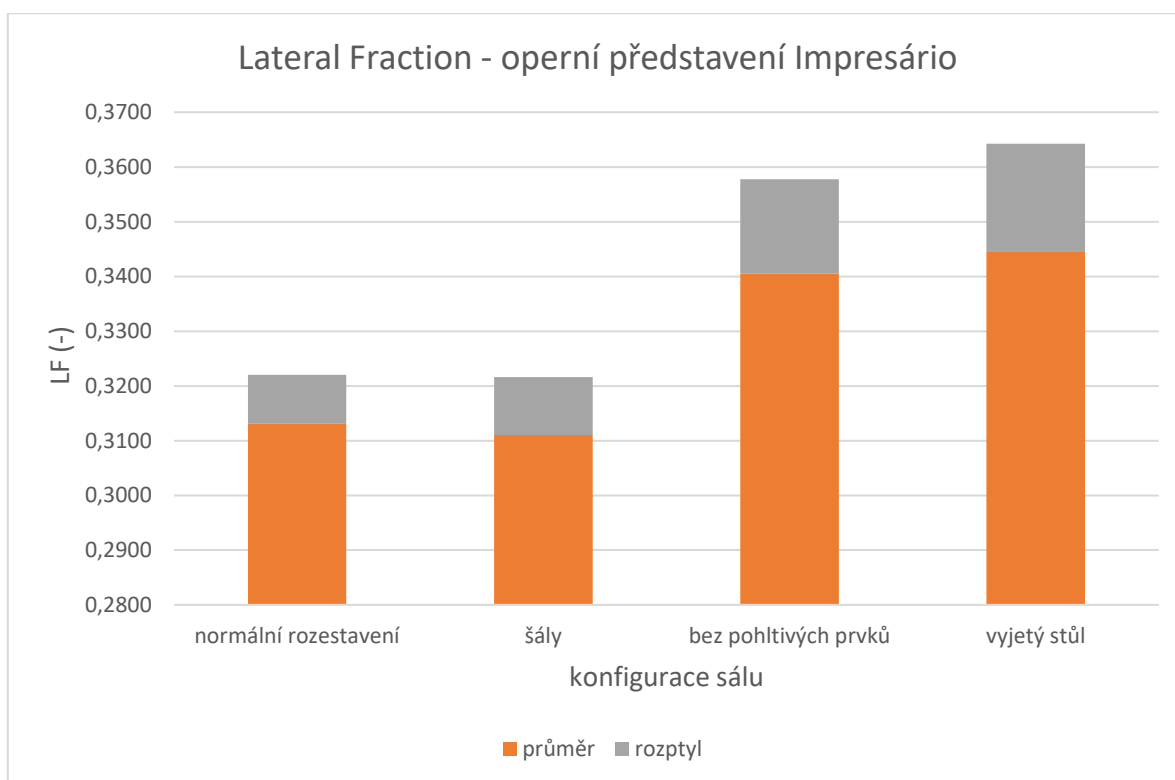
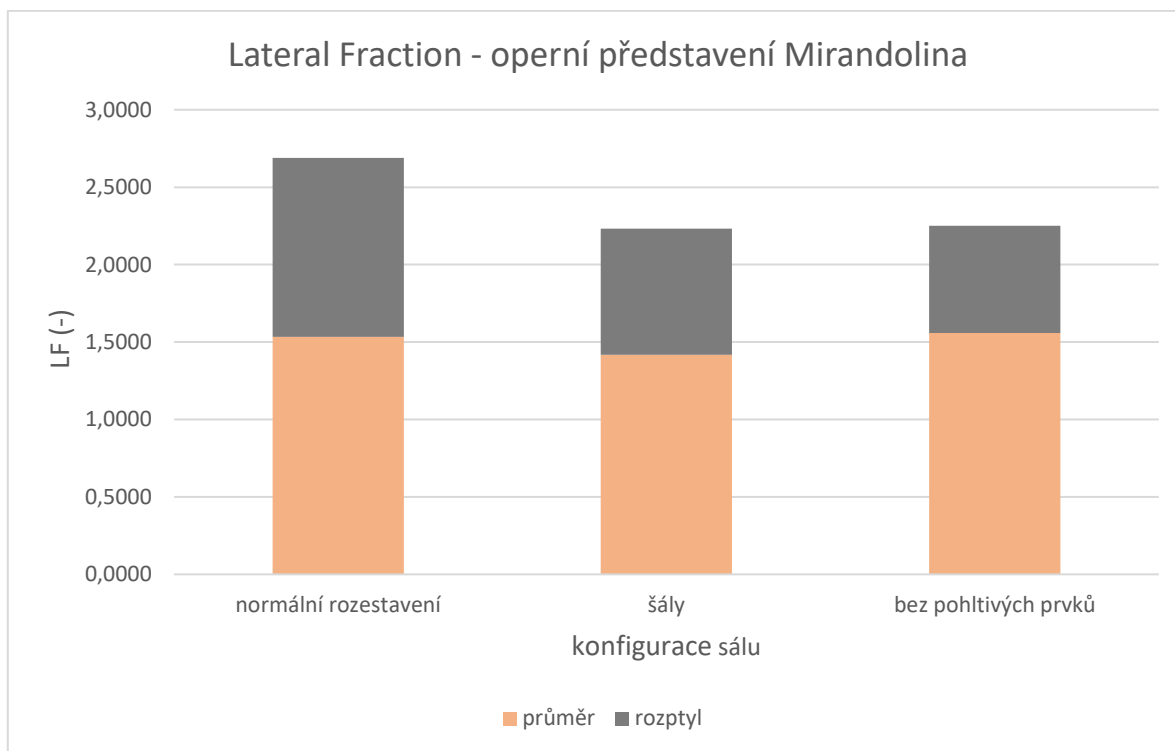




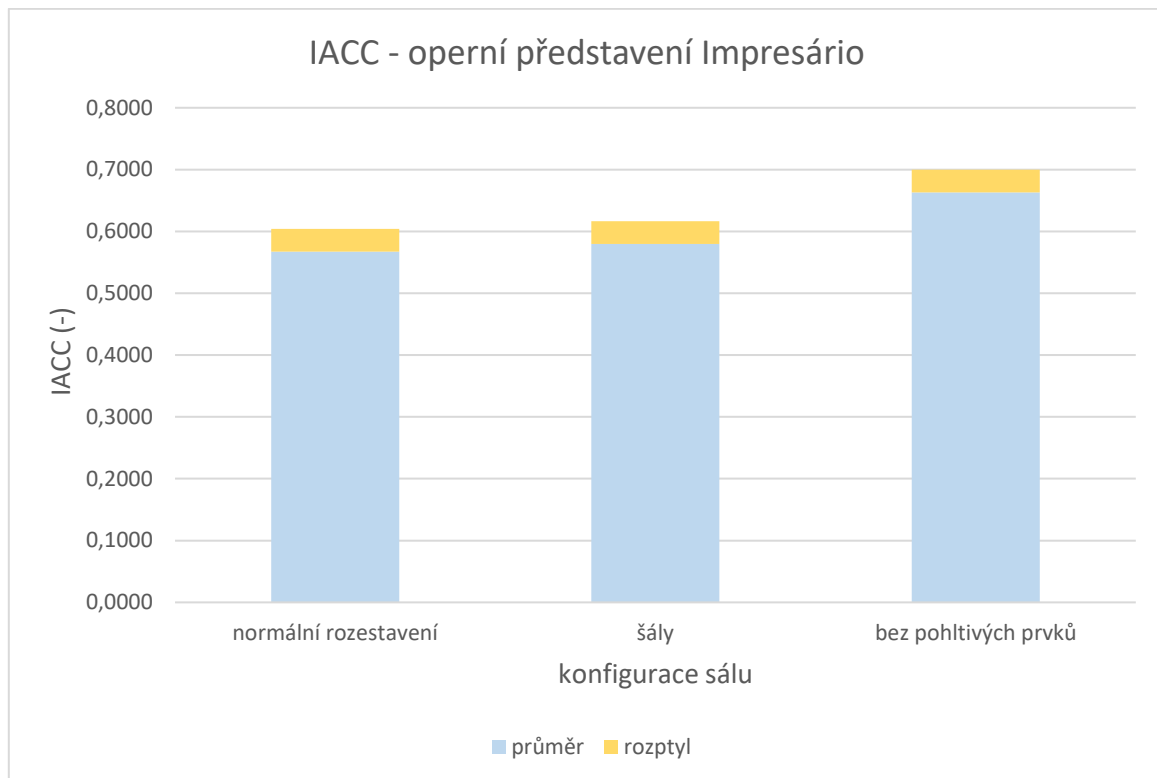




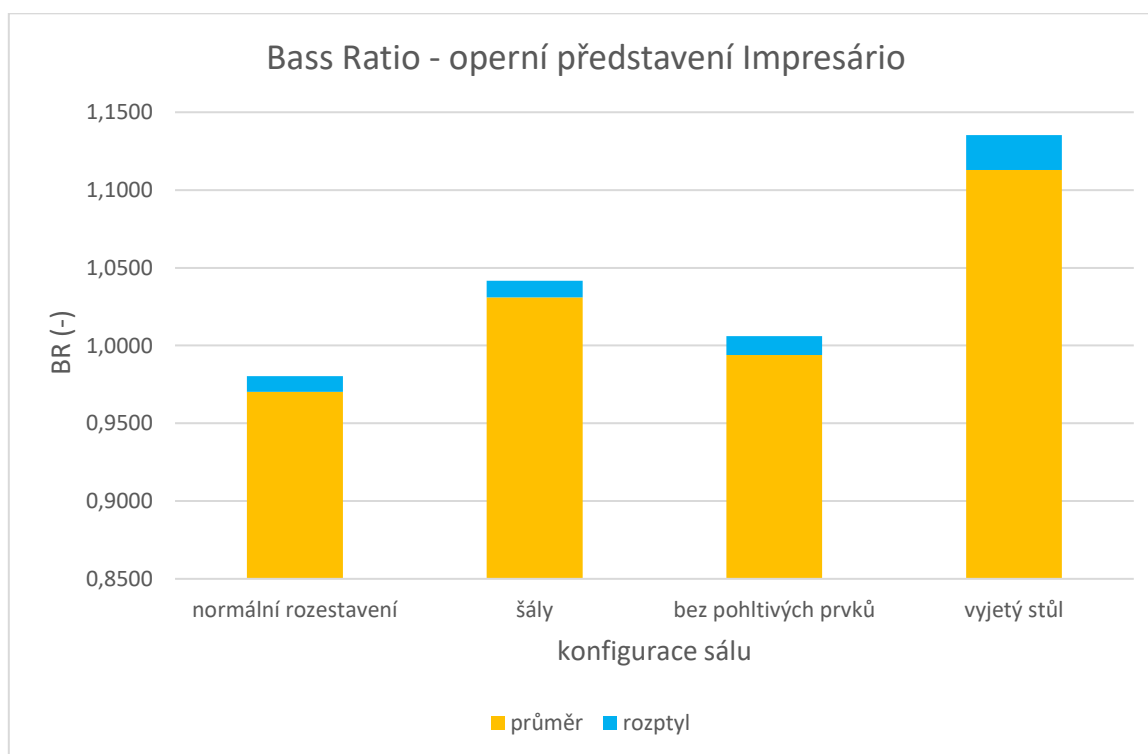
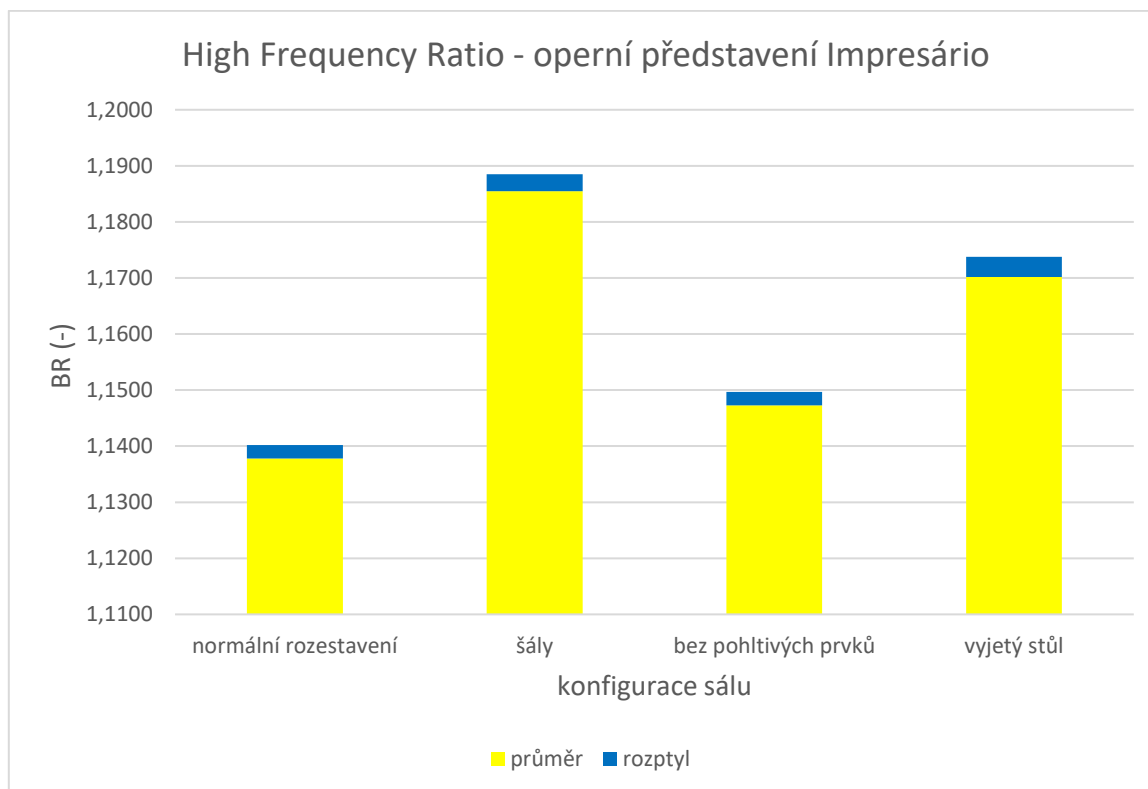
A.3 Znázornění kritérií LF

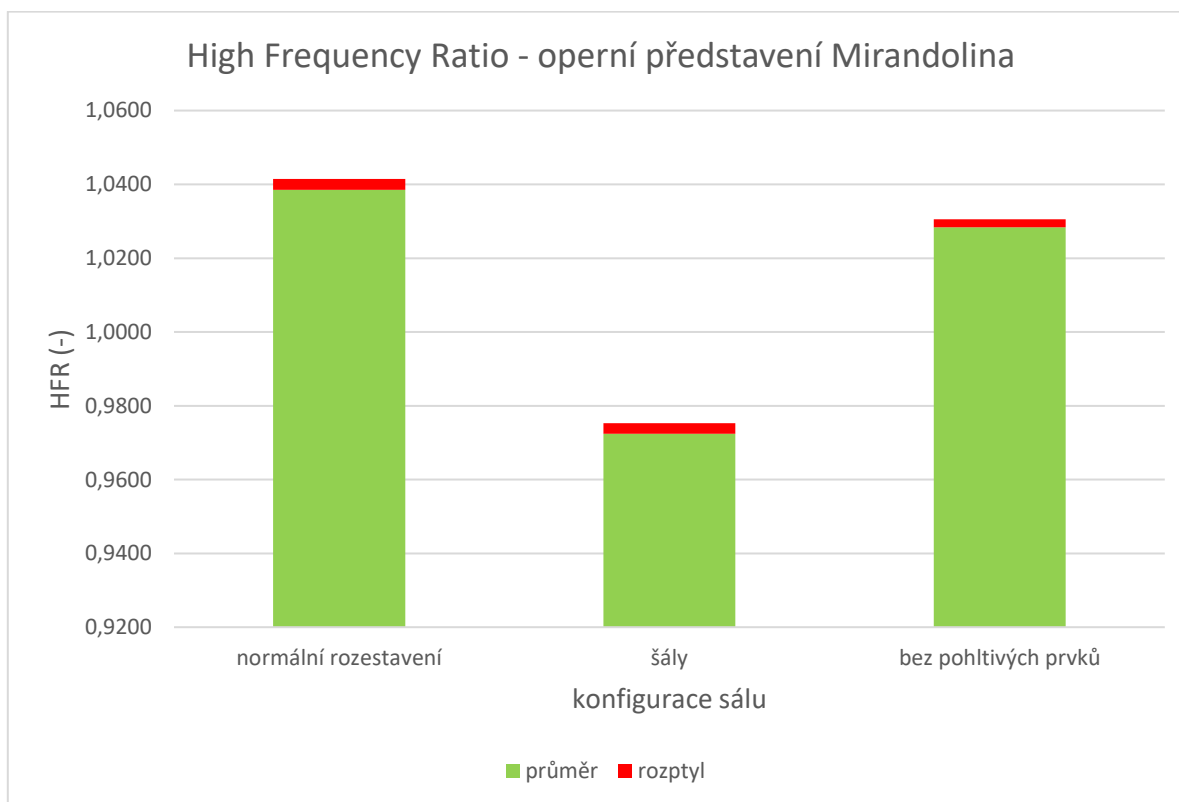
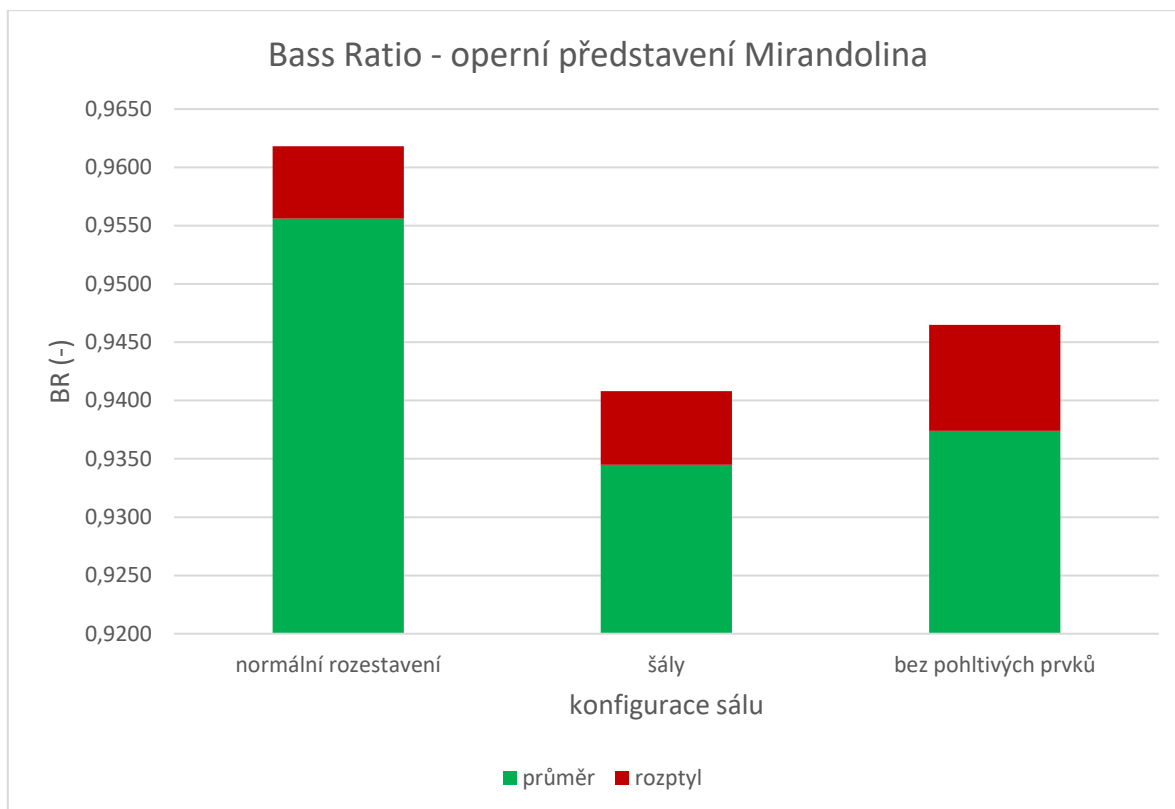


A.4 Znázornění kritéria IACC



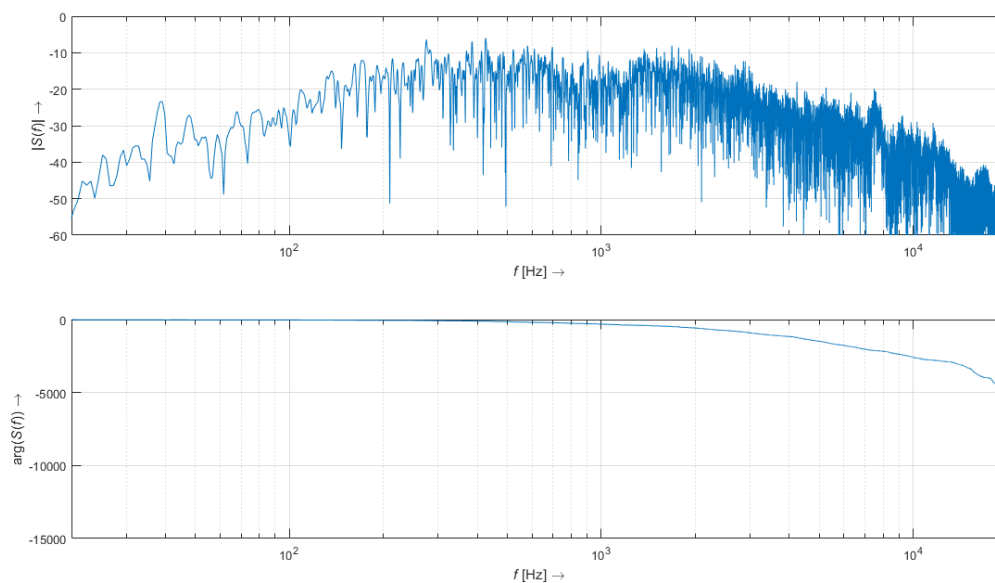
A.4 Znázornění kritérií BR a HFR



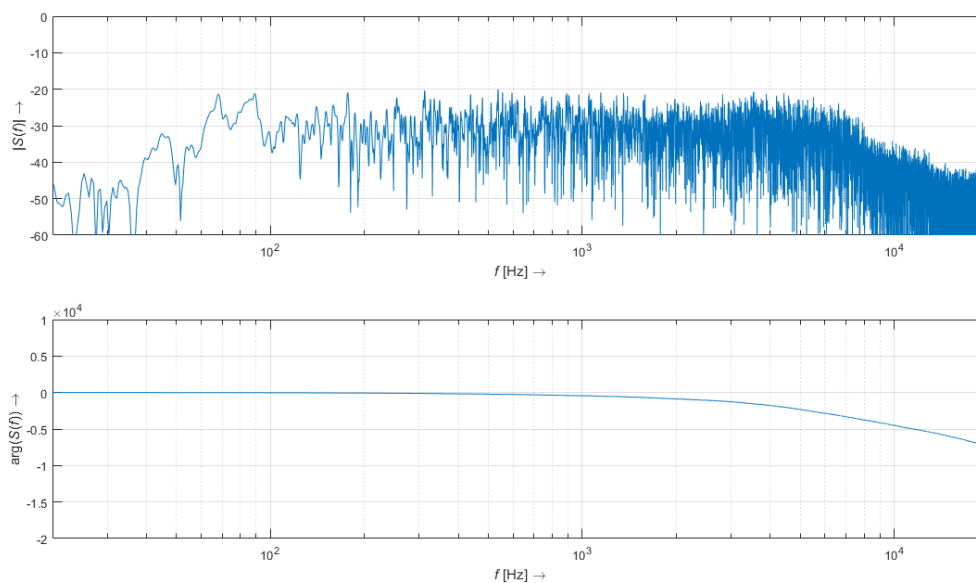


B Grafické znázornění průběhů

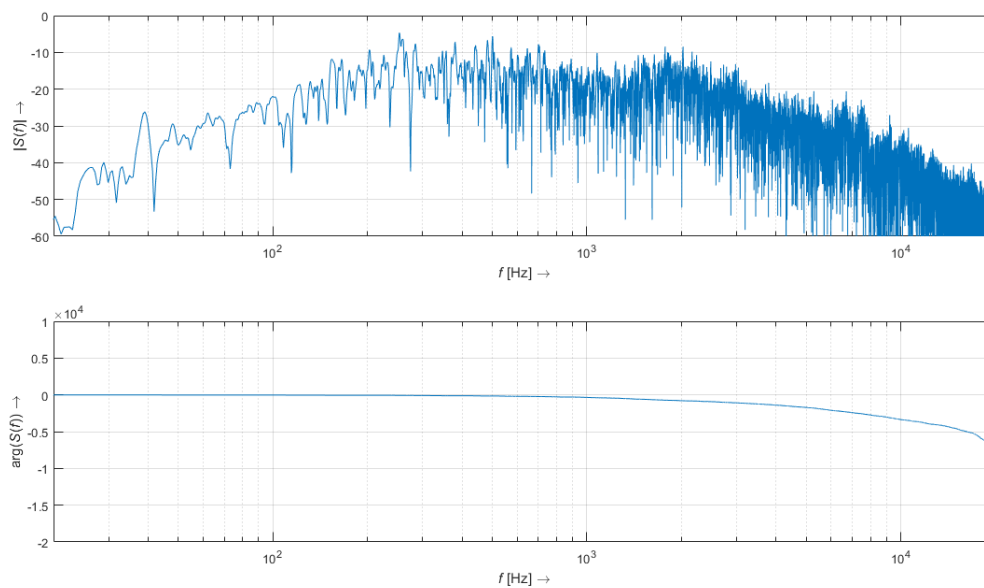
B.1 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace normální rozestavení



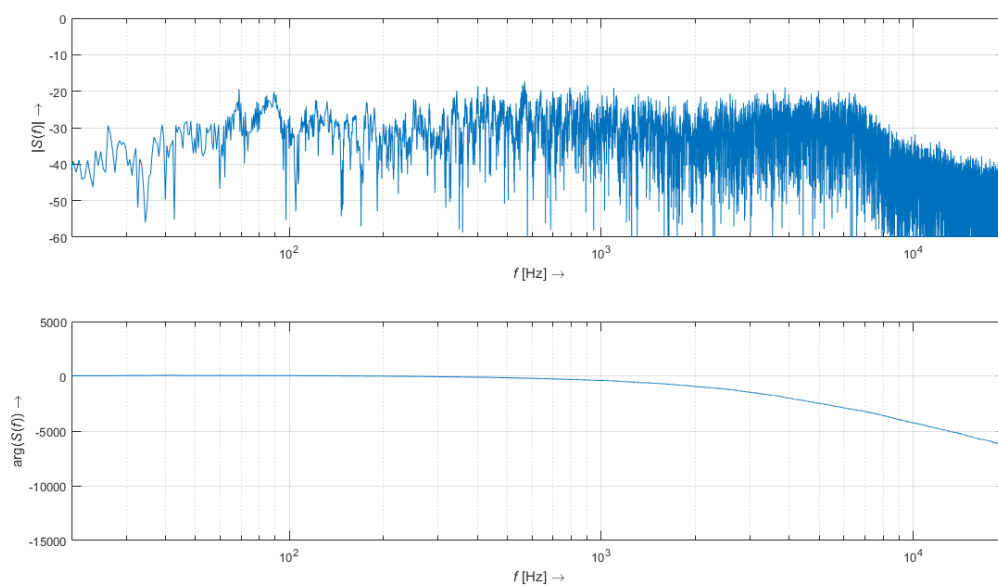
B.2 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace šály



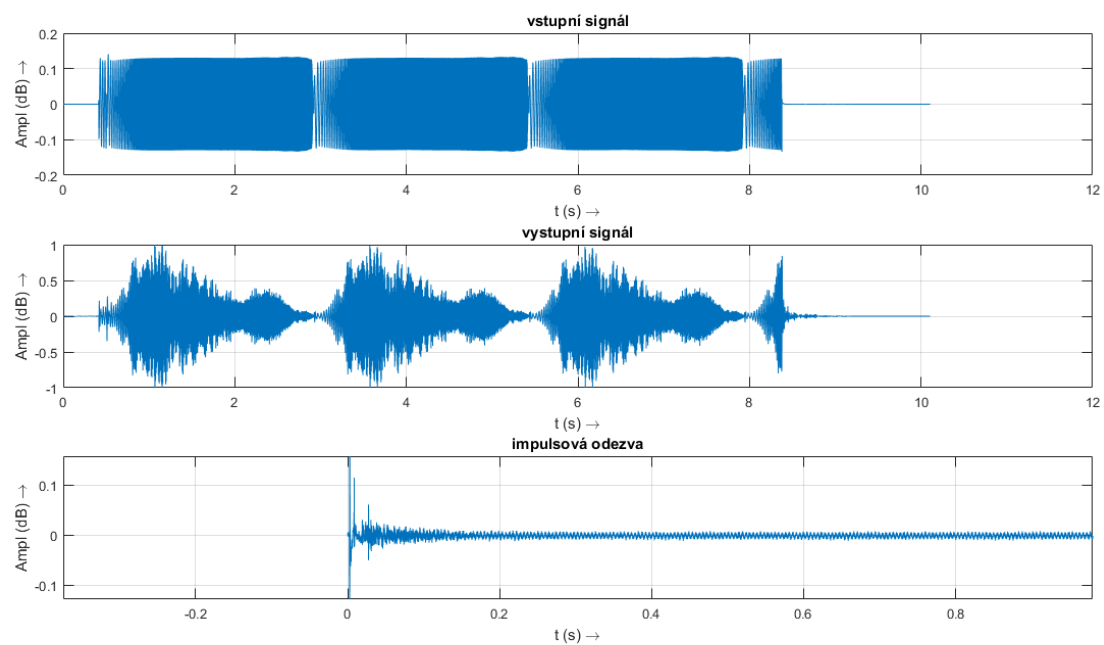
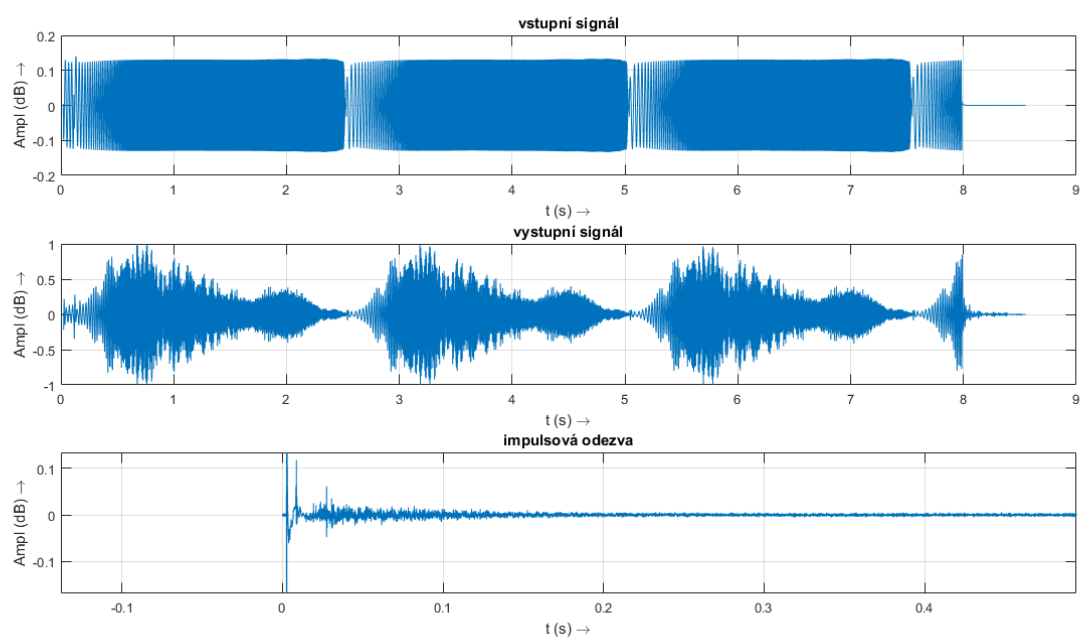
B.3 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace bez pohltivých prvků



B.4 Frekvenční odezva – operní představení Impresário – konfigurace s vyjetým stolem

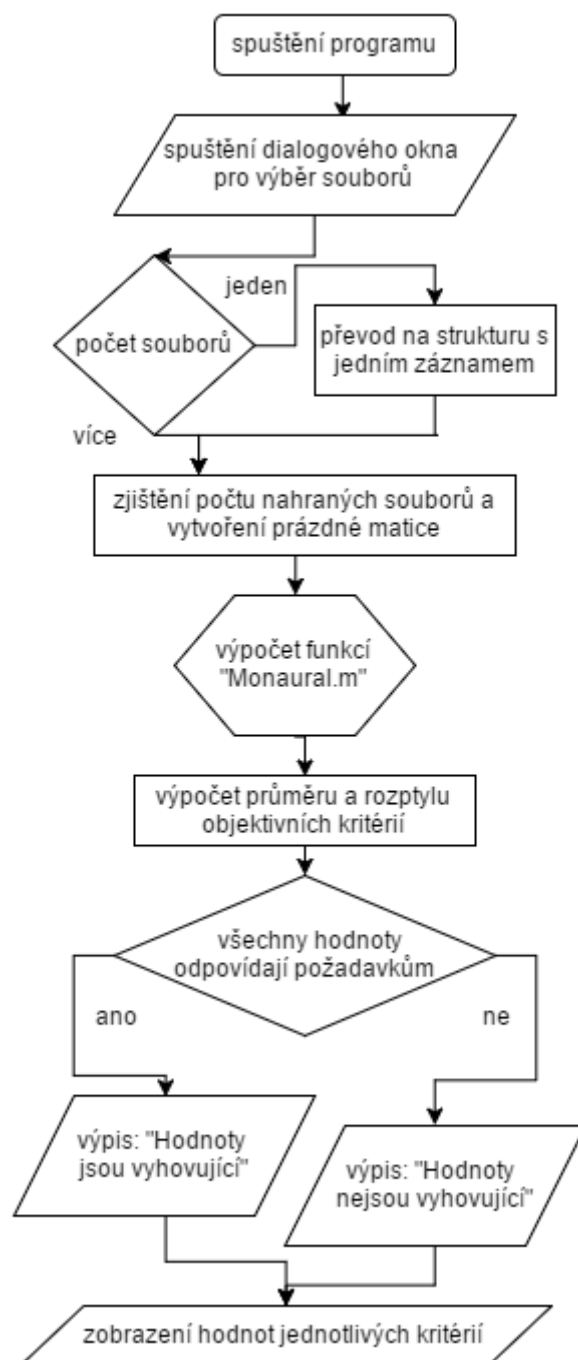


B.5 Impulsové odezvy – operní představení Mirandolina – konfigurace normální rozestavení

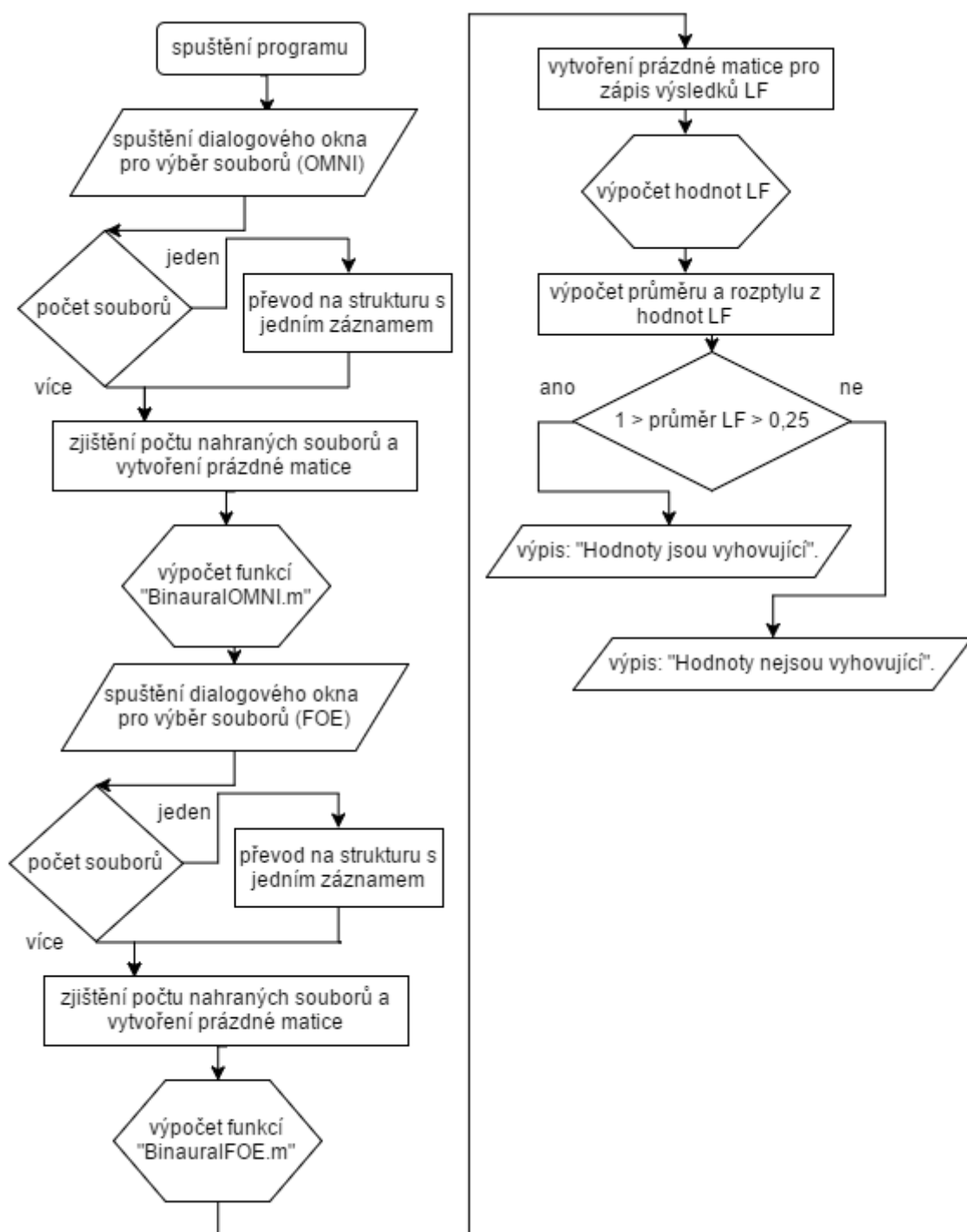


C Vývojové diagramy

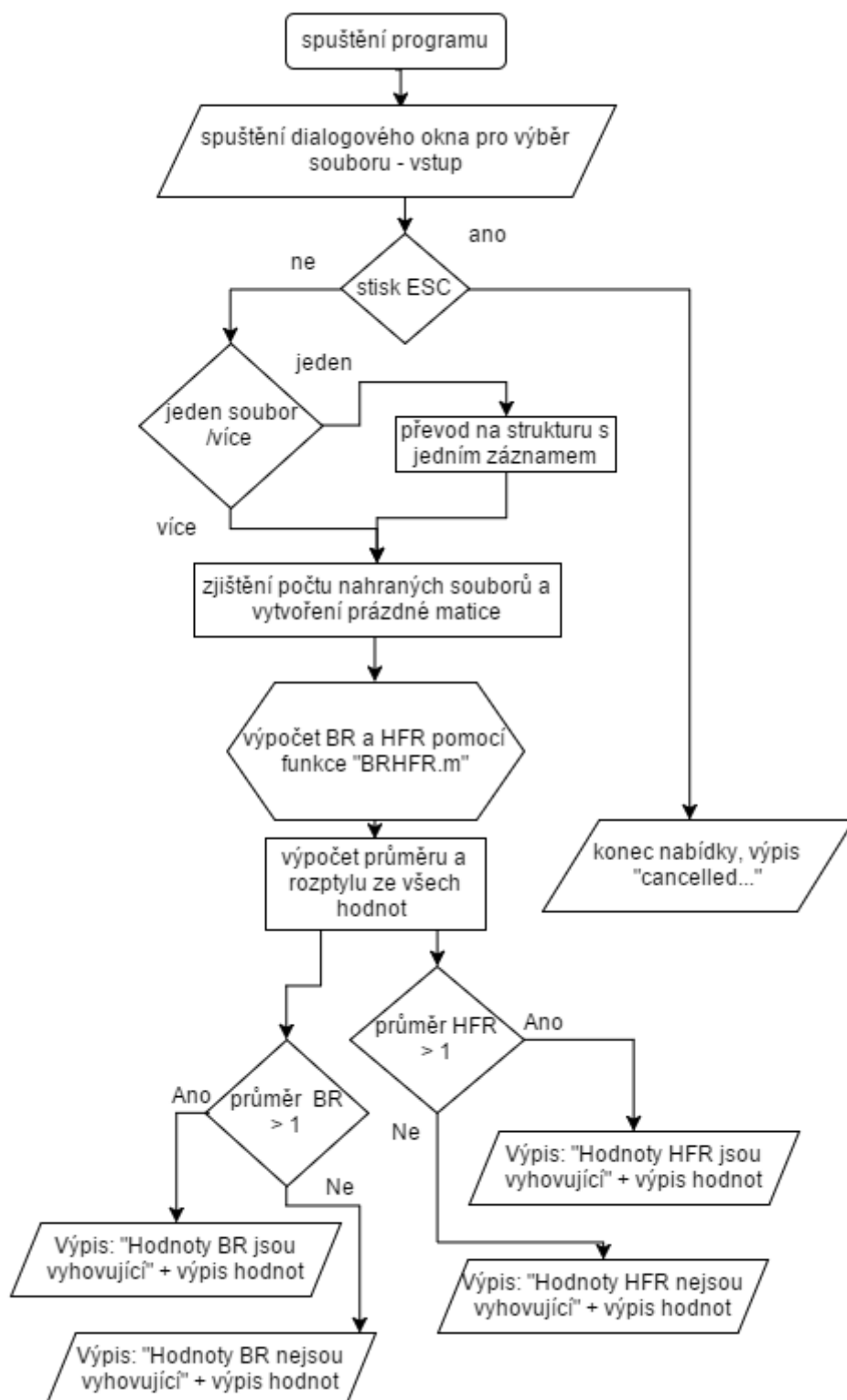
C.1 Diagram „statistikaMonaural.m“



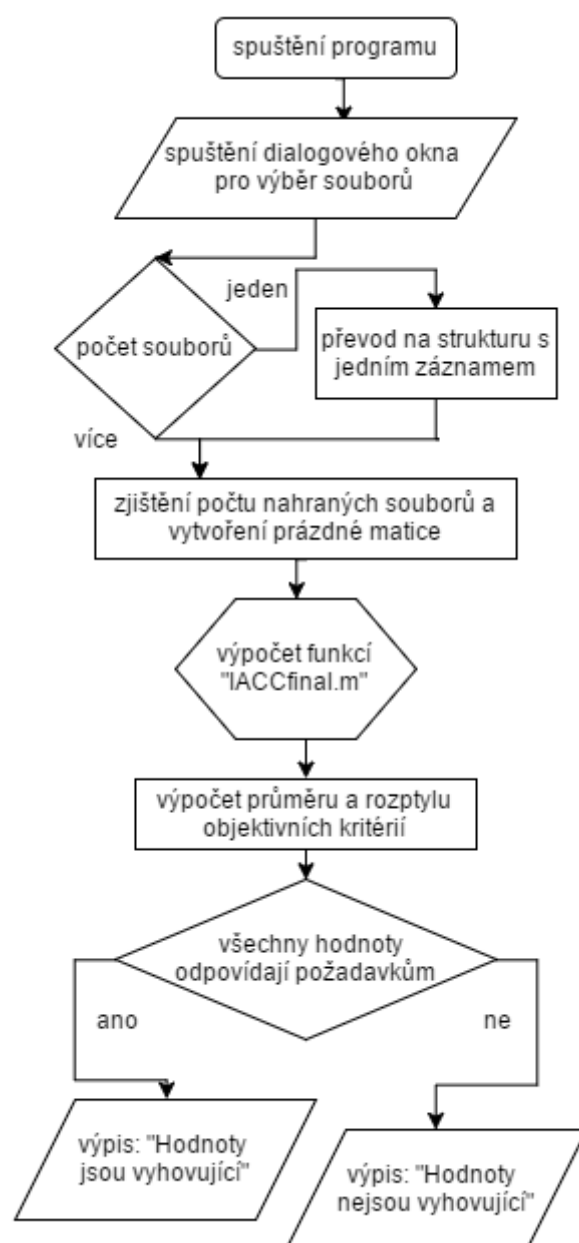
C.2 Diagram „statistikaBinaural.m“



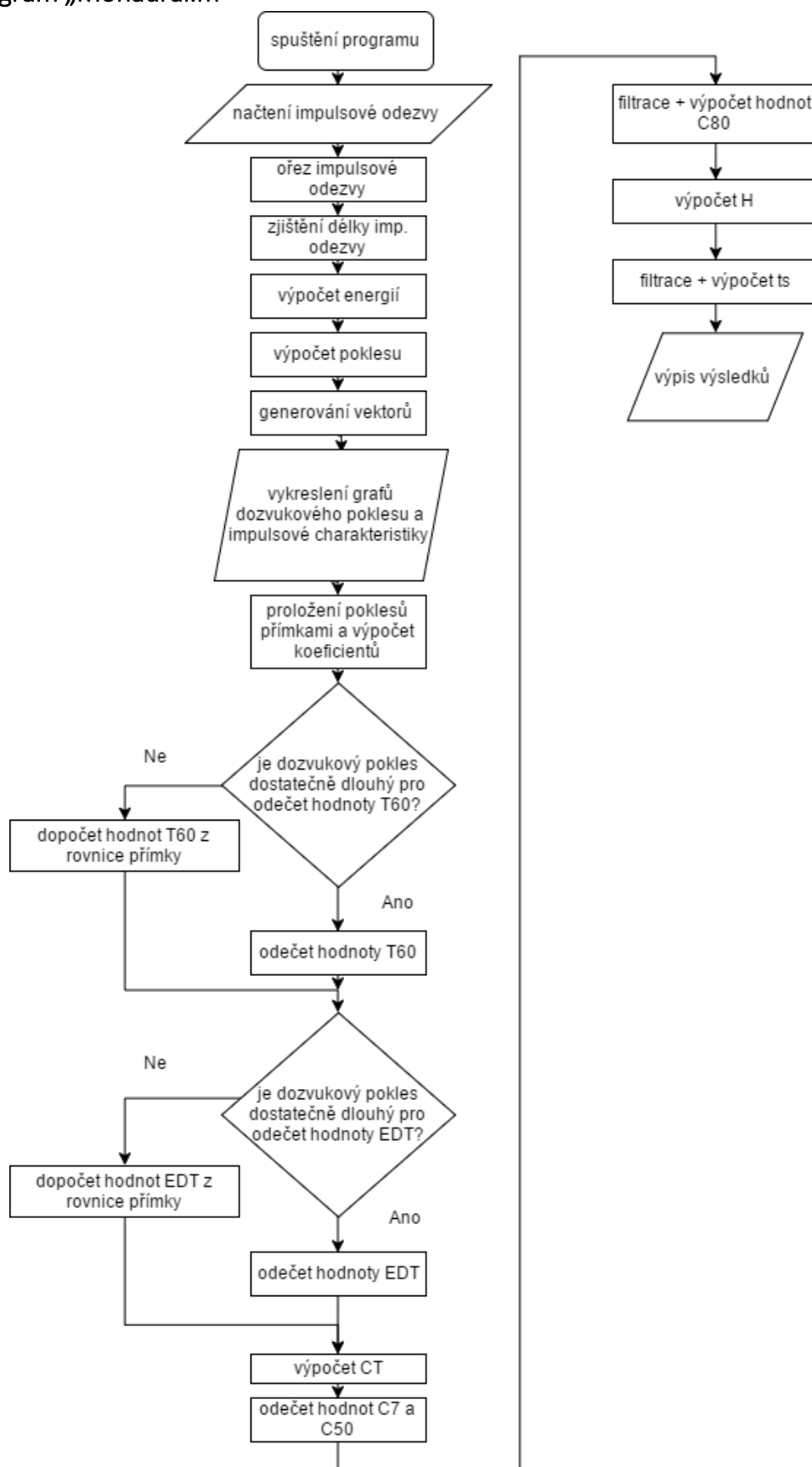
C.3 Diagram „statistikaBRHFR.m“



C.4 Diagram „statistikaACC.m“



C.5 Diagram „Monaural.m“



C.6 Diagram „IACCfinal.m“

